



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**ZKOUŠKY GEOMECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
BRNĚNSKÉHO JÍLU NA REKONSTITUOVANÝCH
VZORCÍCH**

LABORATORY TESTS OF GEOMECHANICAL PROPERTIES OF BRNO CLAY
ON RECONSTITUTED SAMPLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Rozmánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby |
| Pracoviště | Ústav geotechniky |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|--|
| Student | Filip Rozmánek |
| Název | Zkoušky geomechanických vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích |
| Vedoucí práce | Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2019 |
| Datum odevzdání | 22. 5. 2020 |

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- HÁJEK, V., MAŠÍN, D. BOHÁČ, J. Závislost mechanického chování jemnozrnné rekonstituované zeminy na stupni překonsolidace. 2006.
- FENCL, M. Pevnost brněnského téglu v kritickém stavu. 2012.
- BRUNÁT, Z., MAŠÍN, D., BOHÁČ, J. Parametry hypoplastického modelu pro numerický model tunelu Březno. 2009.
- BURLAND, J. B. On the compressibility and shear strength of natural clays. 1990.
- BURLAND, J. B., RAMPELLO, S., GEORGIANNOU, V. N., CALABRESI, G. A laboratory study of the strength of four stiff clays. 1996.
- ZHENSUN, H., JIE, Y., YU-JUN, C. Compression Behaviour of Reconstituted Soils at High Initial Water Contents. 2010.

Další podklady budou předány na základě konzultací v průběhu samotného řešení bakalářské práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce je provedení laboratorních zkoušek stlačitelnosti a smykové pevnosti brněnského neogenního jílu na rekonstituovaných vzorcích. V první části práce bude ozřejmena podstata zkoušení rekonstituovaných soudržných zemin a definovány parametry, které lze z těchto zkoušek získat. V druhé části budou vyhodnoceny zkoušky jednoosé stlačitelnosti. Třetí část bude zaměřena na vyhodnocení trojosých zkoušek smykové pevnosti. Ve čtvrté části bude provedena kritická analýza provedených laboratorních zkoušek a srovnání výsledků s daty z literatury.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá stanovením vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích. Vlastnosti rekonstituovaných zemin se liší od vlastností zemin přírodních kvůli vlivu struktury zeminy. V případě rekonstituovaných zemin hovoříme o tzv. „intrinsic properties“. Cílem práce je popsat tyto vlastnosti a stanovit stlačitelnostní a pevnostní charakteristiky rekonstituovaného brněnského jílu z ulice Křenová. Budou použity edometrický přístroj, triaxiální přístroj a rotační krabicový smykový přístroj. Bude posouzena reálnost výsledků se známými daty z vybrané literatury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Brněnský jíl, rekonstituovaný jíl, intrinsic properties, ICL, stlačitelnost, kritická pevnost, residuální pevnost, edometrická zkouška, triaxiální zkouška, rotační smyková zkouška.

ABSTRACT

This theses is focused on geomechanical properties of reconstituted Brno clay. The properties of reconstituted soils are different from properties of natural soils because of the influence of structure. The properties of reconstituted soils are termed „intrinsic properties“. Object of this theses is to describe these properties and to determine compressibility and strength characteristics of Brno clay using reconstituted samples. These characteristics are obtained using the edometer machine, the triaxial machine and the ring shear apparatus. Calculated data are then compared with known data from literature.

KEYWORDS

Brno clay, reconstituted clay, intrinsic properties, ICL, compressibility, critical strength, residual strength, edometer test, triaxial test, ring shear test.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Filip Rozmánek *Zkoušky geomechanických vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích*. Brno, 2020. 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Zkoušky geomechanických vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

Filip Rozmánek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Zkoušky geomechanických vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

Filip Rozmánek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Juraji Chalmovskému, Ph.D., bez jehož cenných rad by tato práce nevznikla. Děkuji mu za jeho čas strávený se mnou v laboratořích a při společných konzultacích. Dále děkuji firmě Keller Grundbau GmbH za materiál poskytnutý k laboratornímu zkoušení. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu při studiích.

1 OBSAH

| | | |
|---------|--|----|
| 2 | ÚVOD | 2 |
| 3 | VLASTNOSTI REKONSTITUOVANÝCH SOUDRŽNÝCH ZEMIN..... | 3 |
| 3.1 | Definice rekonstituované soudržné zeminy..... | 3 |
| 3.2 | Vliv struktury zeminy na její vlastnosti..... | 3 |
| 3.3 | Stlačitelnost | 4 |
| 3.4 | Smyková pevnost | 9 |
| 4 | TESTOVACÍ PROGRAM | 12 |
| 4.1 | Inženýrsko-geologický popis předmětné lokality..... | 12 |
| 4.2 | Testovací plán..... | 14 |
| 4.3 | Metodika zkoušek a jejich vyhodnocení | 15 |
| 4.3.1 | Příprava vzorků | 15 |
| 4.3.2 | Zkoušky stlačitelnosti | 16 |
| 4.3.2.1 | Edometrická zkouška..... | 16 |
| 4.3.2.2 | Vyhodnocení stlačitelnosti | 18 |
| 4.3.3 | Triaxiální zkouška smykové pevnosti | 21 |
| 4.3.3.1 | Triaxiální zkouška typu CU..... | 23 |
| 4.3.3.2 | Vyhodnocení CU zkoušky..... | 25 |
| 4.3.4 | Rotační krabicová zkouška smykové pevnosti..... | 27 |
| 4.3.4.1 | Vyhodnocení residuální pevnosti z rotační smykové zkoušky..... | 30 |
| 5 | VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK..... | 31 |
| 5.1 | Zkoušky stlačitelnosti..... | 31 |
| 5.2 | Zkoušky smykové pevnosti | 36 |
| 5.2.1 | Triaxiální zkoušky | 36 |
| 5.2.2 | Rotační krabicové smykové zkoušky | 40 |
| 6 | ZÁVĚR..... | 47 |
| 7 | CITOVANÁ LITERATURA | 48 |
| 8 | SEZNAM OBRÁZKŮ | 50 |
| 9 | SEZNAM TABULEK..... | 53 |

2 ÚVOD

Hlavním cílem této práce je provést zkoušky geomechanických vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích, vyhodnotit výsledky a porovnat je s daty z vybrané literatury. Budou popsány a vyhodnoceny zkoušky jednoosé stlačitelnosti a trojosé zkoušky smykové pevnosti.

K provádění zkoušek budou použity přístroje, jimiž disponují geotechnické laboratoře ve výzkumném centru AdMaS a ústav geotechniky na Fakultě stavební VUT. Konkrétně se budou zkoušky stlačitelnosti provádět v tzv. edometrickém přístroji, pevnostní zkoušky v tzv. triaxiálním a rotačním krabicovém smykovém přístroji.

Bude velice zajímavé a přínosné vyhodnotit stlačitelnostní a pevnostní parametry rekonstituovaného jílu z Brna. Zkoušky stlačitelnosti zde budou vyhodnoceny na základě článku „On the compressibility and shear strength of natural clays“ (O stlačitelnosti a smykové pevnosti přírodních jílu (Burland, 1990)). Tento článek nazývá vlastností rekonstituovaných jílu jako „intrinsic properties“. Tento a další pojmy týkající se vlastností rekonstituovaných zemin zde budou vysvětleny.

Bude vyhodnocena kritická a residuální pevnost brněnského téglu na rekonstituovaných vzorcích. Mezi těmito daty panuje v několika pracích nesoulad. Zdrojem, se kterým budu porovnávat naměřená data, budou mj. údaje z diplomové práce Pevnost brněnského téglu v kritickém stavu (Fencl, 2012).

3 VLASTNOSTI REKONSTITUOVANÝCH SOUDRŽNÝCH ZEMIN

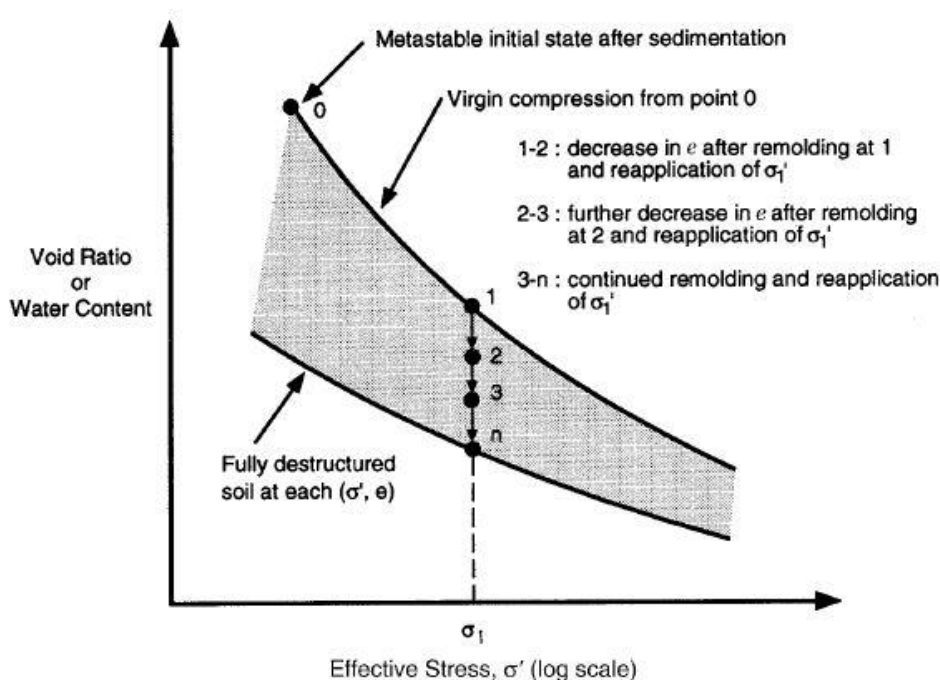
Přírodní zeminy se od rekonstituovaných liší v řadě důležitých ohledů. Tyto rozdíly jsou způsobeny vlivem mikro- a makro-struktury (Burland, 1990). Strukturou se rozumí kombinace „fabric“, tzn. uspořádání částic, a „interparticle bonding“, tzn. vázání částic (Mitchell, 1976). Tyto vlivy budou přesněji popsány v kapitole 3.2. Nyní definuji rekonstituovanou zeminu.

3.1 Definice rekonstituované soudržné zeminy

Rekonstituovaný jíl je definován jako takový, který byl důkladně promíchán s takovým množstvím vody, aby vlhkost byla rovna či větší než vlhkost na mezi tekutosti w_L , a který byl konsolidován, nejlépe za jednoosých podmínek (Burland, 1990). Důležité je, aby mícháním vznikla homogenní pasta bez vzduchových bublin. Svoboda (2010) ve své práci zmiňuje, že rekonstituovaný vzorek by měl být připraven ze zeminy s aktuální vlhkostí bez vysušování v peci. Vysušování způsobuje vznik vazeb v zemině, které způsobí vyšší pevnost i tuhost materiálu.

3.2 Vliv struktury zeminy na její vlastnosti

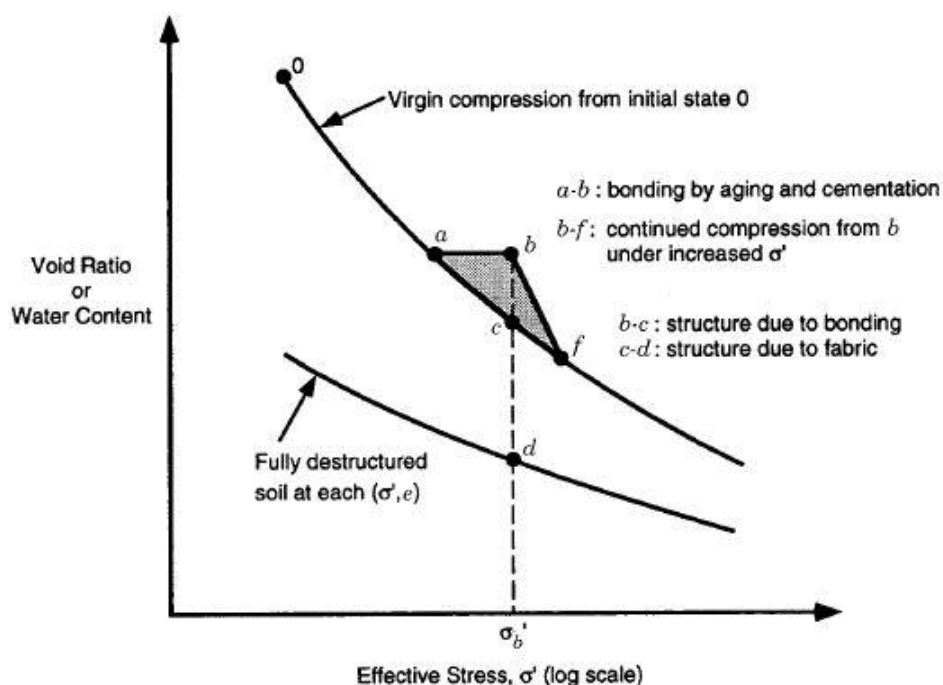
Podle Mitchella a Soga (2005) rozmanitost všech možných uspořádání částic v zemině v kombinaci s mnoha možnostmi jak se částice mohou vzájemně vázat znamená, že počet potenciálních struktur v zeminách je skoro nekonečný. Efekty struktury na mechanické vlastnosti zeminy mohou být stejně důležité jako efekty počátečního čísla pórovitosti a napětí. Struktura tedy ovlivňuje rozdíly mezi



Obr. 1 Vliv metastabilního uspořádání částic na číslo pórovitosti zeminy pod daným efektivním konsolidačním napětím (Mitchell & Soga, 2005)

skutečným číslem pórovitosti při daném efektivním napětí a odpovídajícími hodnotami pro stejnou zeminu v porušeném (destrukturovaném) stavu. Rozdíl mezi číslem pórovitosti zeminy s nějakou strukturou pro dané efektivní napětí (což je případ konsolidace od vysokého čísla pórovitosti v podstatě všech sedimentů) a číslem pórovitosti zcela porušené zeminy je vidět na prvním obrázku (Obr. 1).

Je možné, že zemina je ve stavu napravo od prvotní křivky stlačitelnosti v Obr. 1, což je důsledek vázání chemickou cementací či efektem stárnutí. To můžeme vidět na Obr. 2. Průběh prvotní křivky stlačitelnosti z bodu 0 do bodu *a* je následován vývojem vázání částic, což umožňuje zemině odolávat navíc i napětí *a-b*. V bodě *b* je zemina pod napětím σ_b' , zatímco porušená zemina pod stejným napětím by byla v bodě *d*. Rozdíl v číslech pórovitosti zeminy se strukturou v bodě *b* a destrukturované zeminy v bodě *d* je způsoben vlivem vázání *b-c* (bonding) a vlivem příspěvku od uspořádání částic *c-d* (fabric) (Mitchell & Soga, 2005).



Obr. 2 Možné stavy zeminy v zobrazení závislosti čísla pórovitosti na efektivním napětí (Mitchell & Soga, 2005)

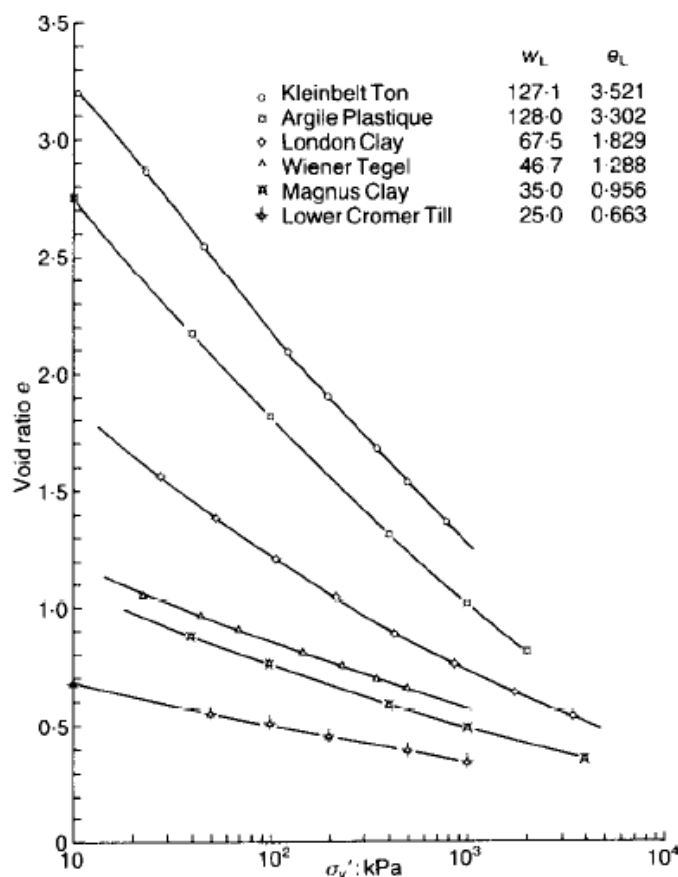
Burland (1990) navrhl způsob jak korelovat deformační chování rekonstituovaných (čili porušených) jílu a jak zjistit vliv struktury na jejich vlastnosti. To popisuje následující kapitola 3.3.

3.3 Stlačitelnost

Vlastnosti zemin, které byly získány ze vzorků jílu, který byl rekonstituován s množstvím vody odpovídajícím vlhkosti mezi w_L a $1,5w_L$ (nejlépe $1,25w_L$), bez toho aby zemina byla sušena, a potom konsolidovány, nejlépe za jednoosých podmínek, se nazývají „intrinsic properties”. Slovo „intrinsic”

v češtině může znamenat přirozený, vnitřní, skutečný či podstatný. Budu používat překlad „vnitřní vlastnosti,” protože mluvit o nich jako o skutečných či podstatných evokuje, že vlastnosti jiné jsou nedůležité. Je velice důležité rozlišit mezi vlastnostmi přírodní zeminy a jejími vnitřními vlastnostmi. Pojem „vnitřní” (intrinsic) se užívá proto, že odkazuje na základní či vlastní (vrozené) vlastnosti zeminy a ty jsou nezávislé na jejím stavu (Burland, 1990). Ideálně by složení vody, použité pro rekonstituci, mělo být podobné složení pórové vody v jílu v jeho přirozeném stavu.

Na Obr. 3 vidíme křivky stlačitelnosti několika rekonstituovaných jílu jako závislost čísla pórovitosti e na svislém efektivním napětí σ_v' , které můžeme nazvat vnitřní křivky stlačitelnosti, jelikož tyto jíly byly rekonstituovány za podmínky $w_L \leq w \leq 1,5w_L$. Tyto křivky mohou být normalizovány pomocí fixních hodnot e_{100}^* a e_{1000}^* (Obr. 4). Hvězdičkou v horním indexu budeme značit, že se jedná o vnitřní vlastnost. Potom e_{100}^* a e_{1000}^* je vnitřní číslo pórovitosti pro $\sigma_v' = 100 \text{ kPa}$, resp. 1000 kPa .



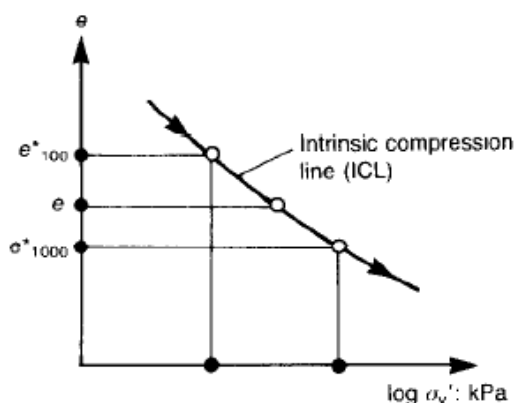
Obr. 3 Jednosé křivky stlačitelnosti pro různé rekonstituované jíly (Burland, 1990)

Můžeme definovat normalizační parametr „void index,” tzn. index pórovitosti¹ I_v jako

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (3.1)$$

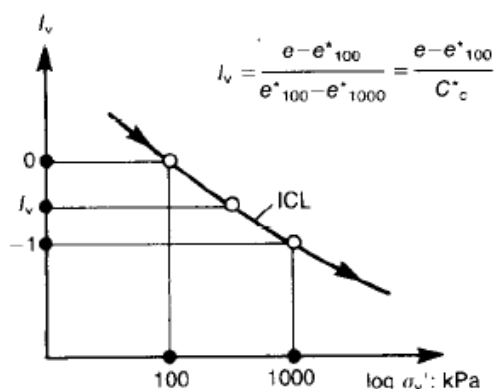
¹ Překlad autora zakládající se na podobnosti void ratio=číslo pórovitosti

kde C_c^* je vnitřní index stlačitelnosti (Burland, 1990).



Obr. 4 Křivka stlačitelnosti pro daný jíl
(Burland, 1990)

Můžeme tedy transformovat křivku stlačitelnosti (Obr. 4) na normalizovanou křivku (Obr. 5). Když $e=e^*_{100}$, $I_v=0$ a když $e=e^*_{1000}$, $I_v=-1$. Dá se říci, že index pórovitosti ukazuje míru vnitřní kompaktnosti sedimentu. Když I_v je menší než nula, tak je sediment kompaktní a když I_v je větší než nula, tak je sediment kyprý (Burland, 1990). Index pórovitosti je tedy definován dvěma přímo měřenými mechanickými vlastnostmi (vnitřními konstantami stlačitelnosti C_c^* a e^*_{100}), které se odvozují z jednoosé zkoušky stlačitelnosti (viz kap. 4.3.2).

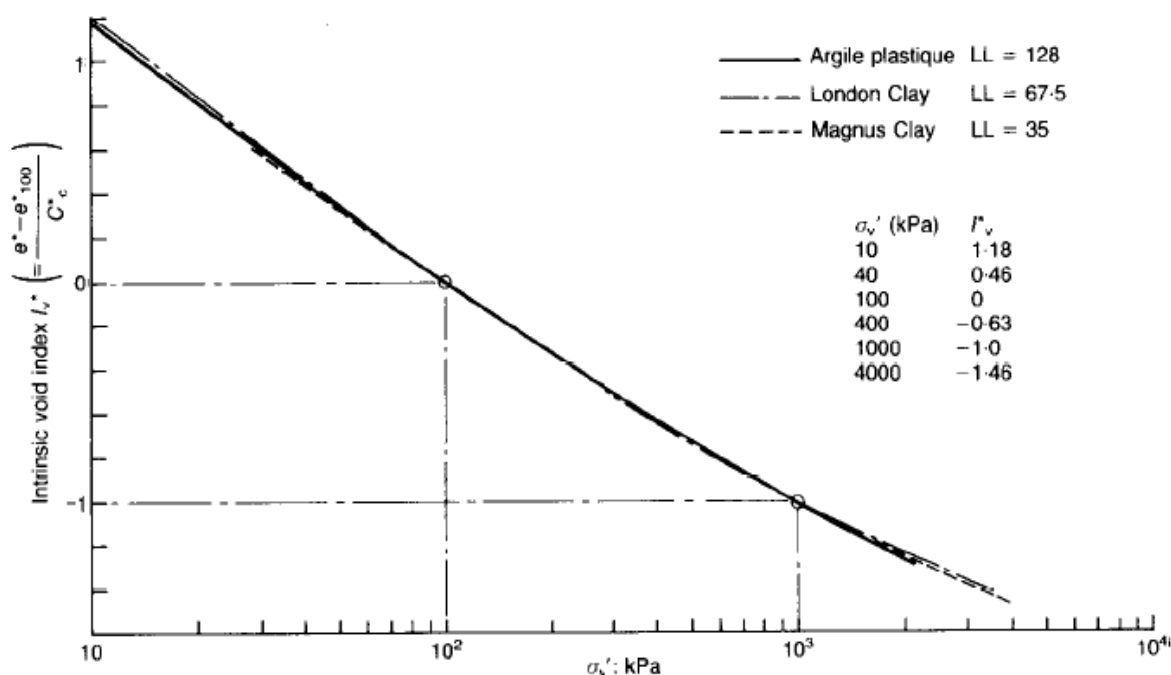


Obr. 5 Využití indexu pórovitosti I_v k normalizaci
vnitřní linie stlačitelnosti (Burland, 1990)

Tři z křivek z Obr. 3 o různých vlhkostech w_L byly Burlandem vyneseny do jednoho grafu v zobrazení I_v vs. σ_v' (Obr. 6). Vznikla unikátní linie ICL=„intrinsic compression line,“ tzn. vnitřní linie stlačitelnosti. Souřadnice této linie jsou jednak dány v obrázku a jednak se dají s dostatečnou přesností vyjádřit kubickou rovnicí

$$I_v = 2,45 - 1,285x + 0,015x^3 \quad (3.2)$$

kde $x=\log \sigma_v'$, kde σ_v' je v kPa (Burland, 1990). Křivky v Obr. 4 a Obr. 5 jsou tedy ICL.

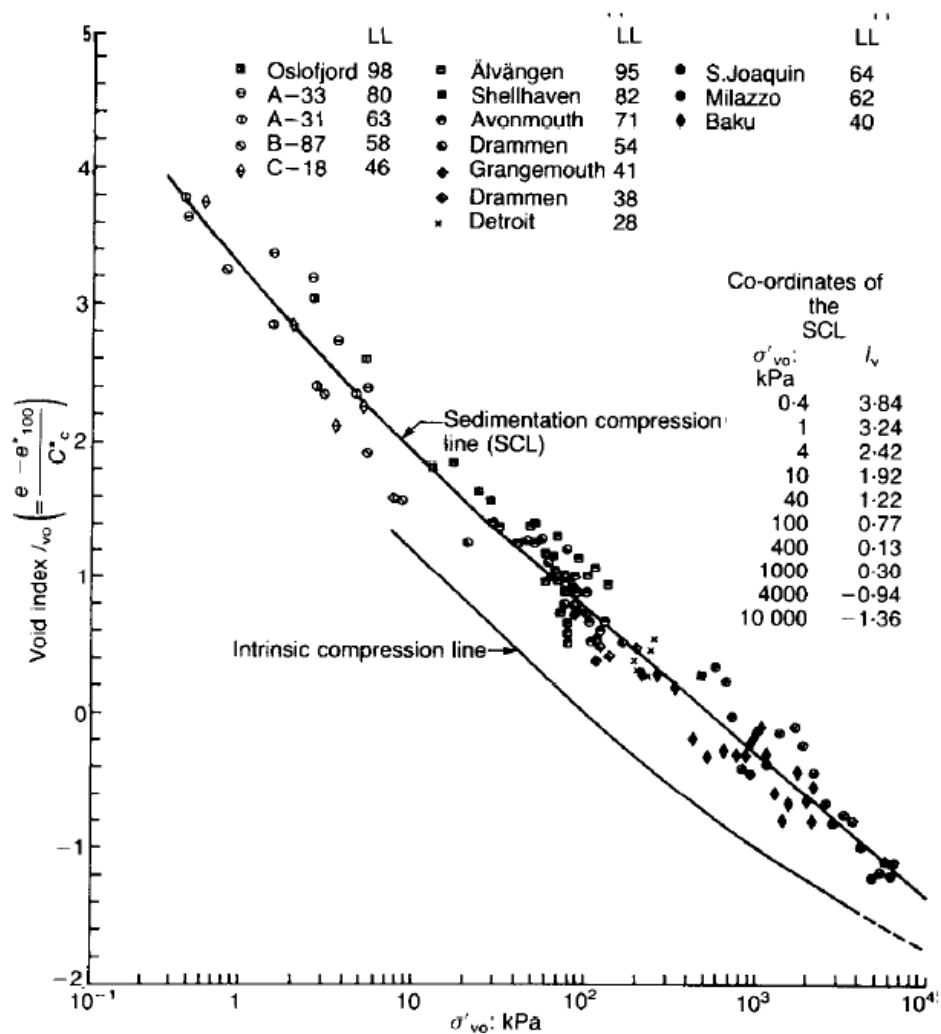


Obr. 6 ICL vzniklá normalizací křivek vnitřní stlačitelnosti z Obr. 3 (Burland, 1990)

Experimenty naznačují, že pokud je zemina rekonstituována při $w_L \leq w \leq 1,5w_L$ a pokud je zatěžovací stupeň dostatečně dlouhý tak, aby proběhla primární konsolidace (viz kap. 4.3.2), tak má ICL přesnou polohu pro napětí větší či rovno 100 kPa (Burland, 1990).

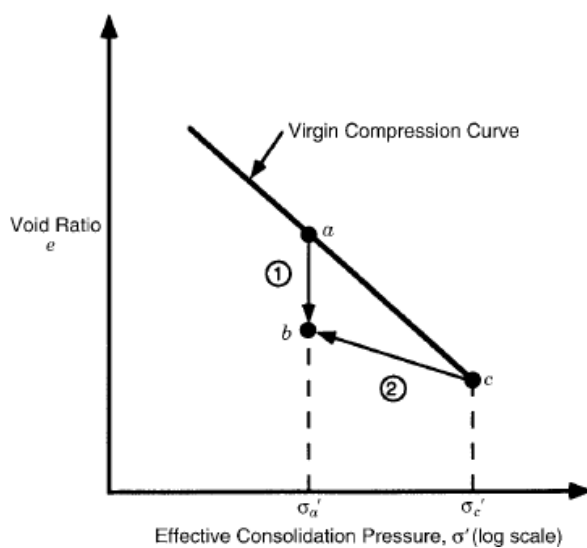
Na Obr. 7 vidíme porovnání stlačitelnosti přirozeně sedimentovaných jílu s vnitřní stlačitelností rekonstituovaných jílu. Daty od Skempton (1970) byla proložena regresní křivka, která byla nazvána SCL=„sedimentation compression line,“ tzn. linie stlačitelnosti sedimentů. Její souřadnice jsou pevně dány Burlandem. Většina dat leží od SCL ve vzdálenosti $I_v = \pm 0,3$. SCL leží nad ICL a vidíme zde podobnost s tvrzením Mitchella a Sogy (2005) (Obr. 1 a Obr. 2). Od hodnoty 10 kPa do 1000 kPa jsou ICL a SCL přibližně rovnoběžné. V tomto intervalu pro danou hodnotu I_v je napětí nesené přírodním jilem přibližně pětikrát vyšší než napětí nesené ekvivaletním rekonstituovaným jilem. Tento fakt potvrzuje zvýšenou odolnost přirozeně sedimentovaného jílu oproti rekonstituovanému, což je způsobeno příspěvkem uspořádání a vázání částic (čili strukturou) skeletu zeminy. Při napětích větších než 1000 kPa mají ICL a SCL tendenci se sbíhat k sobě.

Podle Mitchella a Sogy (2005) platí několik principů ohledně struktury zeminy, které jsou relevantní pro inženýrství. Pod daným efektivním konsolidačním napětím má přírodní zemina menší hustotu než stejná destruktuovaná zemina. Při stejném čísle pórovitosti je přírodní zemina s nahodile orientovanými částicemi více tuhá než porušená zemina. Při vysokých napětích způsobuje přírůstek napětí větší změnu v struktuře neporušené zeminy než v struktuře porušené zeminy. Póry v zemině jsou menší u destruktuované zeminy než u neporušené zeminy. Dva vzorky zeminy mohou mít odlišnou strukturu i když mají stejné souřadnice v zobrazení číslo pórovitosti-efektivní napětí pokud mají odlišnou zatěžovací historii (Obr. 8).

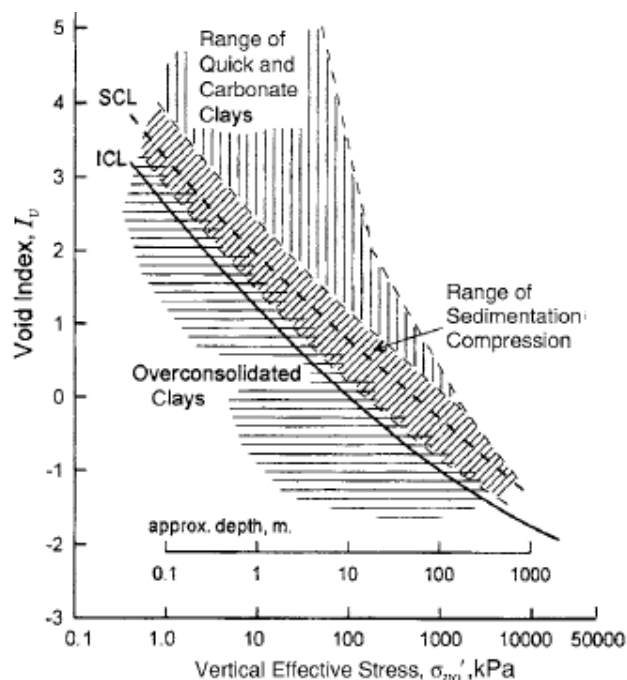


Obr. 7 Porovnání křivek stlačitelnosti normálně konsolidovaných jílu a rekonstituovaného jílu: regresní křivka skrz data NC jílu je SCL (Burland, 1990)

Obecný přehled stavů přírodních zemín in situ v zobrazení vztahu mezi indexem pórovitosti a vertikálním napětím můžeme vidět na Obr. 9 (Chandler, de Freitas, & Marinos, 2004).



Obr. 8 Odlišné způsoby jak dosáhnout stejného stavu v bodu *b* (Mitchell & Soga, 2005)



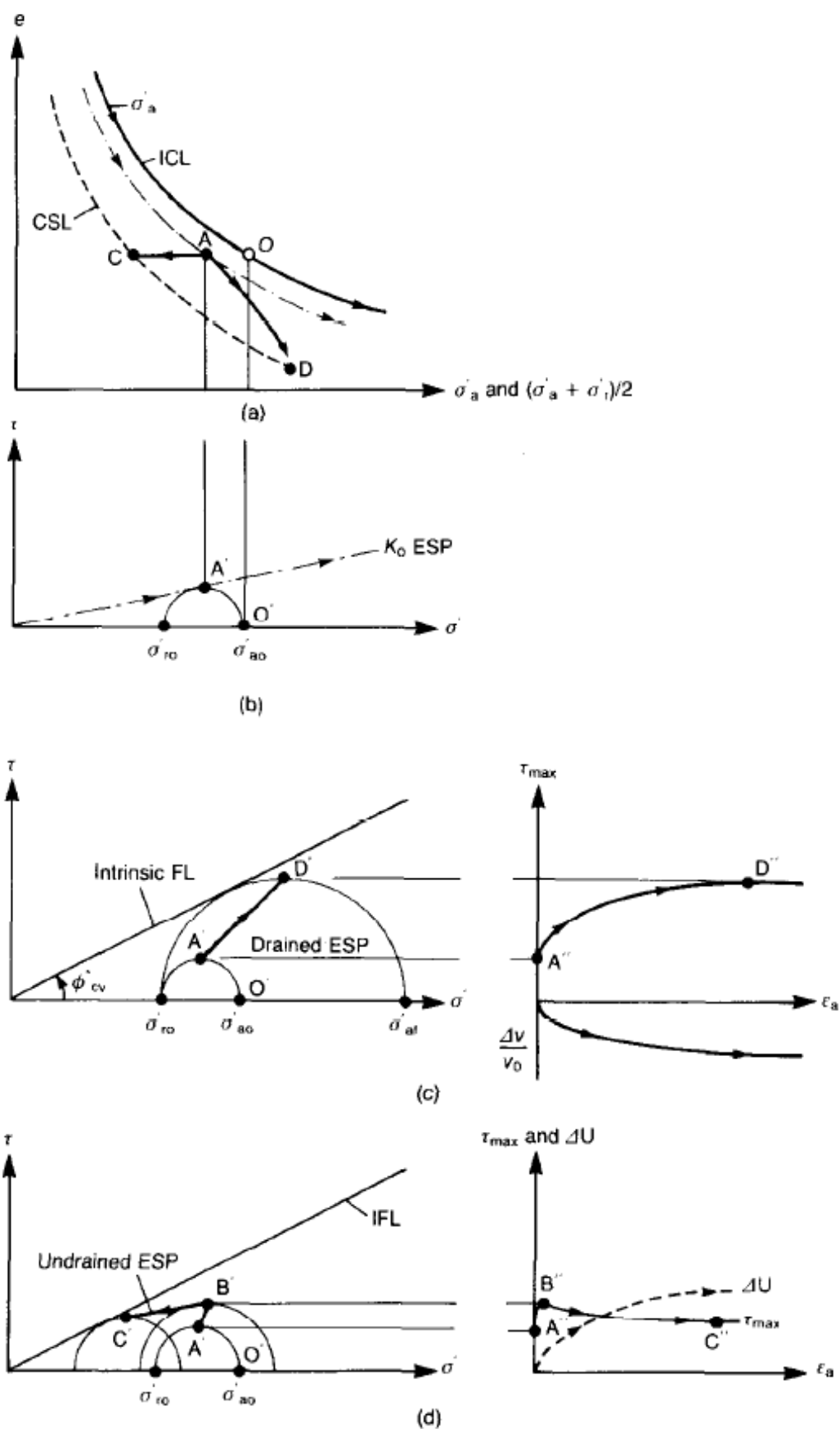
Obr. 9 Přehled přírodních typů jílů v zobrazení index pórovitosti-efektivní napětí (Chandler, de Freitas, & Marinis, 2004)

3.4 Smyková pevnost

K popisu vnitřního smykového chování jednoose konsolidovaného rekonstituovaného jílu budou uvažovány podmínky v triaxiální kompresi.

Na Obr. 10(a) vidíme 1D linii ICL pro rekonstituovaný jíl v zobrazení e vs. σ_a' . Bod O leží na ICL a na Obr. 10(b) můžeme vidět jemu odpovídající Mohrovu kružnici efektivního napětí. Na tomto obrázku dále vidíme bod A' , který udává maximální smykové napětí. Bod A' leží na čáře K_0 ESP=„effective stress path,“ tzn. dráze efektivního napětí, kde K_0 značí klidový zemní tlak. Tyto grafy tedy představují stav napjatosti při přípravě vzorku za K_0 podmínek. Bod A' odpovídá bodu A na Obr. 10(a), který leží na křivce stlačitelnosti pro průměr axiálního a radiálního napětí $(\sigma_a' + \sigma_r')/2$, která je zakreslena jako čerchovaná (Burland, 1990).

Standartní odvozněná triaxiální zkouška (viz kap. 4.3.3) způsobuje narůstání axiálního napětí σ_a' a radiální napětí σ_r' zůstává konstantní. Na Obr. 10(c) je Mohrova kružnice pro počáteční stav vzorku konsolidovaného na axiální efektivní napětí σ'_{a0} a druhá kružnice pro stav porušení při napětí σ'_{af} . Vnitřní linie porušení IFL=„intrinsic failure line“ je tečnou k Mohrově kružnici při porušení a linie $A'D'$ reprezentuje dráhu efektivního napětí při této zkoušce. Na grafu vpravo jsou zobrazeny závislosti maximálního smykového napětí a objemových změn na osovém přetvoření. Z průběhu je patrné, že objem vzorku se zmenšuje a při porušení je změna objemu nulová. Jedná se tedy o tzv. CD zkoušku na normálně konsolidovaném rekonstituovaném vzorku jílu (viz kap. 4.3.3).



Obr. 10 Ideální chování jednoose konsolidovaného rekonstituovaného jílu v triaxiální kompresi:
a) e vs. σ'_a a $(\sigma'_a + \sigma'_i)/2$, b) K_0 podmínky, c) odvodněná zkouška, d) neodvodněná zkouška (Burland, 1990)

Za těchto předpokladů můžeme konstatovat, že stav porušení v Obr. 10(c) odpovídá kritickému stavu a úhel vnitřního tření označíme φ_{cs}^* , kde hvězdička opět značí vnitřní vlastnost. Dráha $A'D'$ se zobrazí jako dráha AD na Obr. 10(a), kde bod D leží na CSL=„critical state line,“ tedy linii kritických stavů, která je zakreslena jako čárkovaná (Burland, 1990).

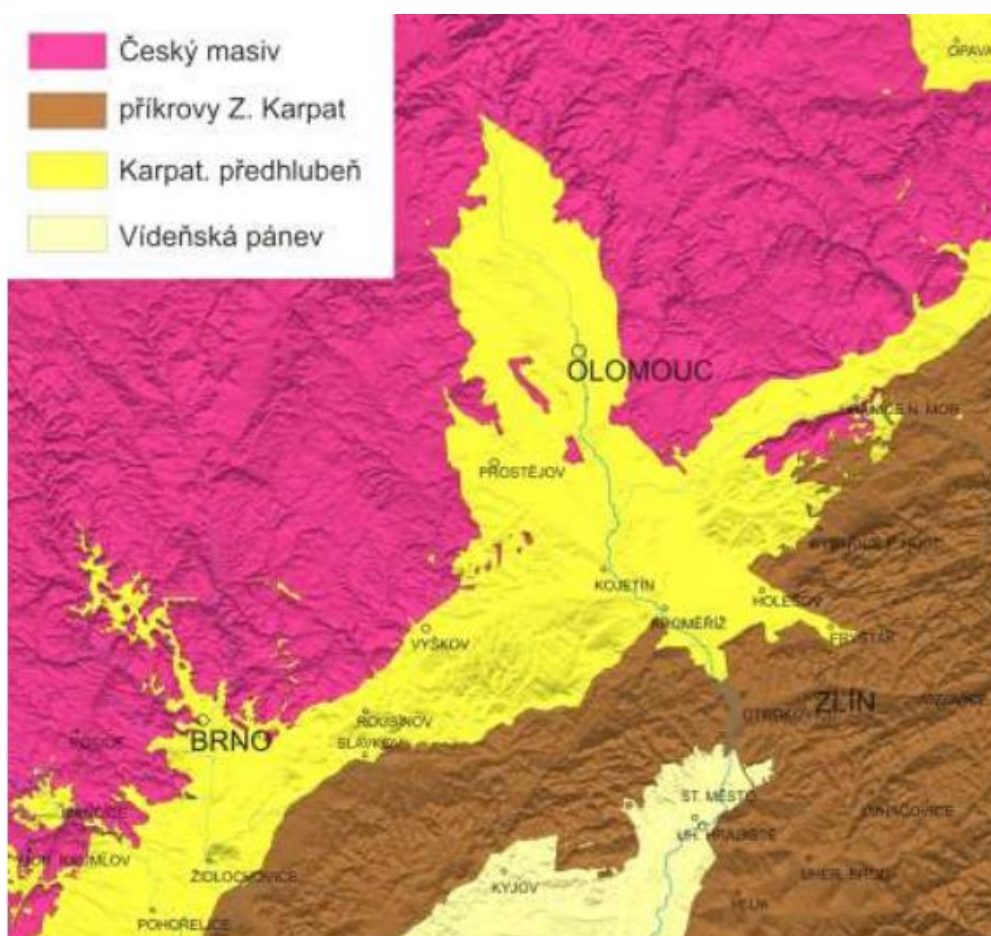
Neodvodněná triaxiální zkouška normálně konsolidovaného rekonstituovaného vzorku jílu je znázorněno níže na Obr. 10(d). Jedná se o tzv. CU zkoušku (viz kap. 4.3.3 a 4.3.3.1). Většina jednoose konsolidovaných rekonstituovaných jílu dosáhne vrcholové pevnosti při velmi malých přetvořeních, což ukazuje bod B'' v grafu vpravo. Potom křivka klesá, zatímco dochází k velkému vzrůstu pórových tlaků a při porušení je změna pórových tlaků nulová. Dráha efektivního napětí pro případ neodvodněných podmínek v triaxiální zkoušce je dána body $A'B'C'$, kde bod B' odpovídá vrcholové pevnosti a bod C' kritické pevnosti. Této dráze odpovídá linie AC na Obr. 10(a), kde bod C leží na CSL (Burland, 1990).

Čárkovaná spojnice bodů CD na Obr. 10(a) tedy představuje vnitřní linii kritických stavů (ICSL), jelikož se vztahuje k rekonstituované zemině. Vnitřní linie kritických stavů tedy leží vlevo od ICL (Burland, 1990).

4 TESTOVACÍ PROGRAM

4.1 Inženýrsko-geologický popis předmětné lokality

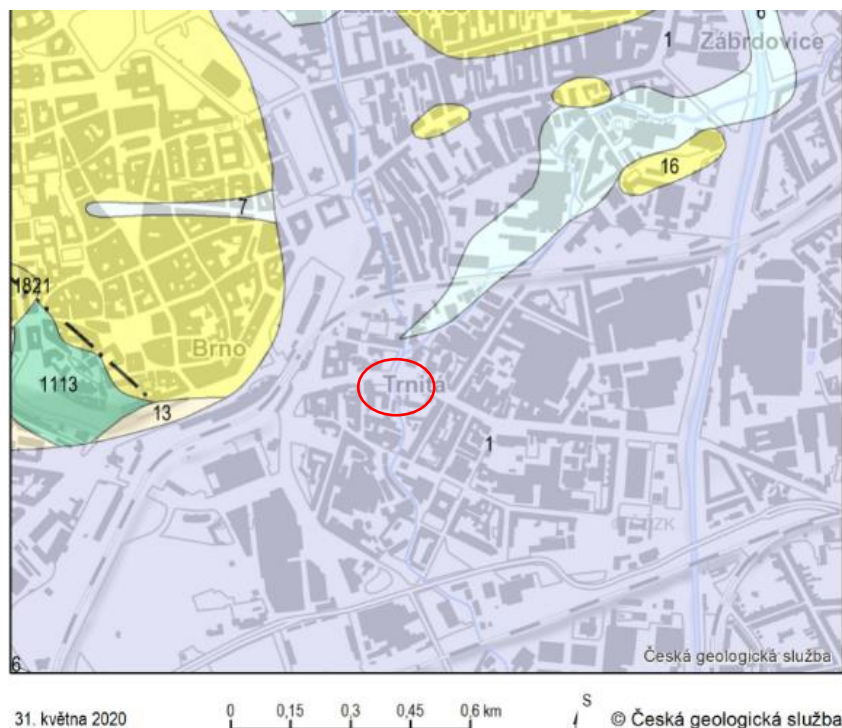
Brno z geologického hlediska spadá do karpatské předhlubně, která se nachází na rozhraní Českého masivu a Západních karpát (Obr. 11). Zájmové území leží v geomorfologickém celku Dyjsko-svrateckého úvalu. Podloží je tvořeno výrazně překonsolidovanými² neogenními jíly, tzv. tégly, které mají zvlněný povrch. Tyto jíly mají charakter zeminy v povrchových zvětralých vrstvách a v hlubších vrstvách mají charakter poloskalní horniny. Kvartérní pokryv zájmové oblasti je tvořen eolickými sprašemi, sprašovými hlínami, fluvialními písky a štěrky (Hruby, 2018).



Obr. 11 Geologická mapa (Pavlová, 2011)

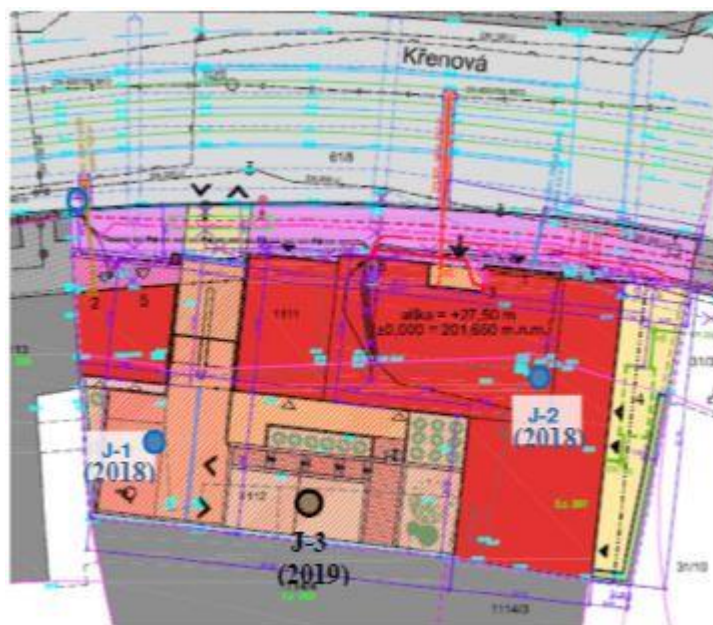
Neogenní jíly jsou velmi málo propustné a vrstvy těchto jílu v podloží, místy o mocnosti až několik stovek metrů, působí pro vodu jako izolant. Pro pohyb podzemních vod v neogenních sedimentech jsou tak nepříznivé podmínky.

² Překonsolidací se rozumí stav, kdy aktuální napětí působící na zeminu je menší než napětí působící v minulosti



Obr. 12 Geologická mapa oblasti zájmu: fialová-navážka, žlutá-spraš, modrá-nivní sediment (ČGS, 2020)

Zemina použitá na laboratorní zkoušky, provedené v rámci této práce, pochází z podloží ulice Křenová v Brně. Na této lokalitě probíhá stavba bytového domu s osmi nadzemními podlažími a dvěma podzemními podlažími. Předpokládané založení bylo pilotové (Hruby, 2018). Vzorky byly odebrány dne 6.2.2019 z jednoho vrtu (J-3/2019), který byl vyhotoven rotačním jádrovým vrtáním (Obr. 13).



Obr. 13 Poloha vrtu J-3/2019 ve stavební jámě (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019)

V následující tabulce (Tab. 1) vidíme popis vrtného jádra. Hloubka je vztažena na aktuální úroveň dna stavební jámy v den vrtání (6.2.2019), která byla 2 m pod původním terénem.

| HLOUBKA | POPIS |
|--------------|---|
| 0.00-2.75 m | Hlína, tmavě hnědá, konzistence tuhé až pevné, s hloubkou konzistence více tuhá |
| 2.75-3.75 m | Hlína, světle hnědá, konzistence měkká až tuhá |
| 3.75-4.25 m | Hlína písčitá až písek s příměsí jemnozrnné zeminy, voda naražena v hl. 3.75 m |
| 4.25-5.50 m | Zahliněné šterky, valouny až 4-8 cm |
| 5.50-6.00 m | Šterk s příměsí jemnozrnné zeminy, načervenalé zbarvení, velikost až 10 cm |
| 6.00-6.50 m | Zahliněný šterkopísek, úlomky/valouny granodioritu |
| 6.50-7.00 m | Ubývání šterku a písku, více soudržné |
| 7.00-7.30 m | Jíl písčitý |
| 7.30-8.00 m | Jíl |
| 8.00-8.25 m | Jíl písčitý-šterkovitý |
| 8.25-20.00 m | Jíl |

Tab. 1 Popis vrtu (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019)

Neogenní jíl použitý pro laboratorní zkoušky pochází z hloubky 9.0 m. Z hlediska zatřídění dle ČSN 736133 se jedná o jíl s vysokou plasticitou (F8=CH). Obsahuje téměř 97 % jemných částic (f) a přibližně 3 % písčitých (s). V Tab. 2 vidíme indexové vlastnosti této zeminy.

| INDEXOVÉ VLASTNOSTI DLE ČSN 736133 | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Vlhkost w [%] | 29.3 |
| Vlhkost na mezi tekutosti w_L [%] | 66 |
| Vlhkost na mezi plasticity w_P [%] | 31.5 |
| Index plasticity I_P [%] | 34.5 |
| Index konzistence I_C | 1.06 |
| Konzistenční stav zeminy dle I_C | Pevná či tvrdá |
| Zatřídění | F8=CH, Jíl s vysokou plasticitou |

Tab. 2 Indexové vlastnosti zeminy (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019)

4.2 Testovací plán

V rámci této práce byly provedeny dva typy zkoušek. Prvním typem je zkouška stlačitelnosti, druhým jsou zkoušky pevnosti. Oba typy byly provedeny na rekonstituovaných vzorcích brněnského téglu.

Zkoušení probíhalo většinou v geotechnických laboratořích výzkumného centra AdMaS a částečně v laboratořích ústavu geotechniky na Fakultě stavební VUT. Ke zkouškám stlačitelnosti byly použity edometrické přístroje jak v centru AdMaS, tak na Fakultě stavební. Celkově bylo provedeno pět zkoušek, z toho čtyři v centru AdMaS.

Ke zkouškám pevnosti byly použity dva druhy přístrojů. Triaxiální přístroj v laboratoři AdMaS (v únoru 2020 přesunut na ústav geotechniky) a rotační krabicový stroj na ústavu geotechniky. V triaxiálním přístroji byly provedeny čtyři zkoušky, v rotační smykové krabici dvě zkoušky.

4.3 Metodika zkoušek a jejich vyhodnocení

4.3.1 Příprava vzorků

Jak už bylo řečeno, rekonstituovaný jíl vzniká mícháním přírodního jílu s vodou. V laboratoři se neporušený vzorek jílu nastrouhá a smíchá s pitnou vodou. Množství vody se zvolilo tak, aby výsledná vlhkost byla v rozmezí $w_L \leq w \leq 1,5w_L$. Míchání probíhá v mixéru po dobu několika hodin, dokud nevznikne homogenní jílová pasta.

Pasta se dále musí jednoose konsolidovat. K tomuto účelu se naplní do dutých válců o průměru 50 mm (pro potřebu edometrické zkoušky) a 38 mm (pro triaxiální zkoušky)³. V těchto válcích se vytvoří vertikální napětí pomocí přitěžovacích závaží, aby zemina mohla konsolidovat (Obr. 14 a Obr. 15). Závaží se přidává po krocích a sleduje se deformace (stlačení) pasty po každém kroku. Finální hodnota



Obr. 14 1D konsolidace rekonstituovaného jílu pro triaxiální zkoušky

³ Pro potřeby rotační smykové zkoušky se z podstaty věci tento krok neprovádí (viz kap. 4.3.4)

napětí byla 80 kPa pro zeminu ve válci určenou pro edometrickou zkoušku a 100 kPa pro triaxiální zkoušku.

Důležité je zajistit, aby pasta byla po dobu konsolidace plně nasycená vodou. Tímto postupem vznikne tuhá pasta. Před příslušnou zkouškou se z trubice vytlačí potřebně vysoký válec jílu. Trubice se potom znovu postupně zatíží na původní napětí. Doba mezi vytlačením vzorku a osazením do přístroje musí být co nejkratší tak, aby nedocházelo k vysušování materiálu.



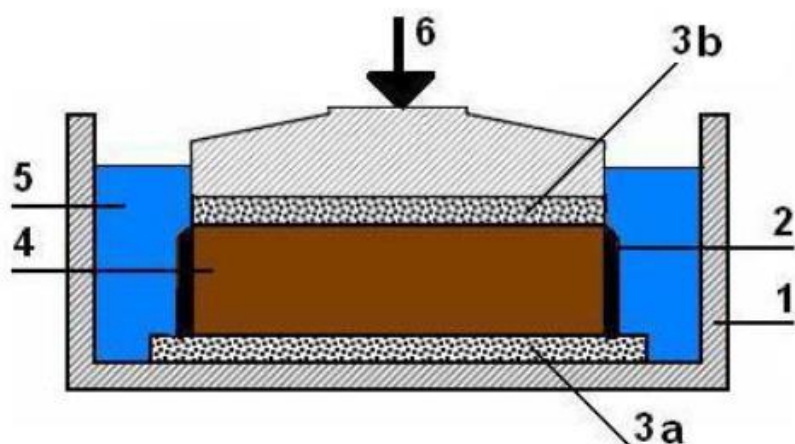
Obr. 15 1D konsolidace rekonstituovaného jílu pro edometrické zkoušky

4.3.2 Zkoušky stlačitelnosti

4.3.2.1 Edometrická zkouška

Edometr či oedometr je zařízení sloužící k měření stlačitelnosti zeminy. Jedná se o jednoosé stlačení (deformaci) a jednoosou konsolidaci vzorku zeminy v tzv. edometrické krabici. Podstatou edometru je to, že dochází pouze ke svislému stlačení a vodorovnému přetvoření je bráněno. Jedná se tedy o trojosou napjatost. Konsolidace obecně může obecně v zemině probíhat trojrozměrně, ale i v řadě praktických úloh můžeme, tak jako v edometru, uvažovat proudění vody pouze ve svislém směru. Další charakteristikou edometru je, že zatěžování probíhá po zatěžovacích krocích. Nyní podrobněji popíšeme základní části přístroje.

Nejzákladnější částí je edometrická krabice. Schéma můžeme vidět na Obr. 16. Do krabice se na porézní destičku umístí válcový vzorek zeminy (průměr 50 mm, výška 20 mm) v edometrickém prstenci, který zabraňuje radiální deformaci v průběhu zkoušky (Obr. 17). Zemina je při osazení plně



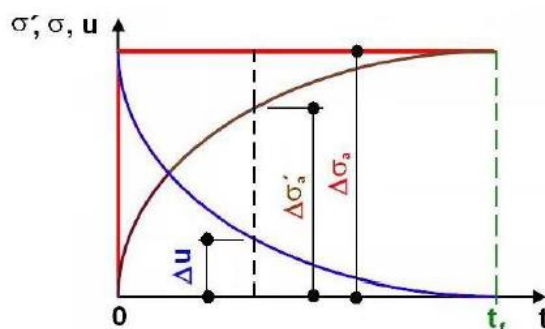
Obr. 16 Schéma edometrické krabice (1-edometrická krabice, 2-edometrický prstenec, 3-porézní destičky, 4- vzorek zeminy, 5-voda, 6-svislé zatížení) (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)

nasycená ($S_r=1$). Na horní plochu vzorku se také umístí porézní destička. Porézní destičky vodorovně ohraničují vzorek a umožňují svislé proudění vody. Krabice se pak zalije vodou tak, aby bylo udržováno stoprocentní nasycení vzorku v průběhu zkoušky. Je možné umístit z obou stran vzorku filtrační papíry, které slouží k tomu, aby se porézní destičky nezanášely vyplavováním částeczek ze vzorku. Následně probíhá zatěžování po krocích až do dosažení maximálního napětí a odtížení opět po krocích. Je nutné sledovat a zaznamenávat stlačení vzorku pomocí vhodného měřidla.



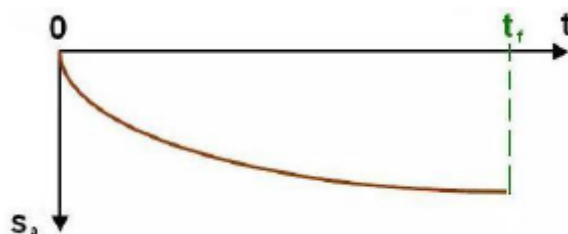
Obr. 17 Vzorek v prstenci před zkouškou, $d=50\text{ mm}$, $v=20\text{ mm}$

Můžeme se podrobněji zaměřit na průběh jednoho zatěžovacího kroku. Při přírůstku zatížení na začátku kroku ($\Delta\sigma_a$) se ve vzorku se $S_r=1$, jehož propustnost je nízká (např. jíl) ukáže změna napětí jako navýšení pórového tlaku ($\Delta u = \Delta\sigma_a$) a změna efektivního svislého napětí je nulová ($\Delta\sigma'_a=0$). Jedná se tedy o tzv. neodvodněné podmínky. Už několik sekund po zatížení vzorku začne voda z pórů vytékat a dochází ke snížení tlaku v pórech a ke stlačení (snížení póvitosti). Efektivní napětí se přitom zvyšuje ($\Delta u < \Delta\sigma_a$, $\Delta\sigma'_a > 0$). Svislé zatížení působící na vzorek se projeví v plné hodnotě až když je pórový tlak



Obr. 18 Průběhy napětí σ'_a , σ_a a u v závislosti na čase t (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)

disipován a je tedy dosaženo celé stlačení vzorku ($\Delta u = 0$, $\Delta \sigma_a = \Delta \sigma'_a$). Jedná se tedy o tzv. odvodněné podmínky a primární konsolidace je ukončena. Tento průběh můžeme vidět na Obr. 18 výše a Obr. 19 níže.



Obr. 19 Závislost stlačení vzorku s_a na čase t (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)

4.3.2.2 Vyhodnocení stlačitelnosti

Z edometrické zkoušky můžeme získat několik důležitých parametrů. Patří mezi ně číslo stlačitelnosti C_c . Tuto veličinu vyhodnotíme z naměřených závislostí.

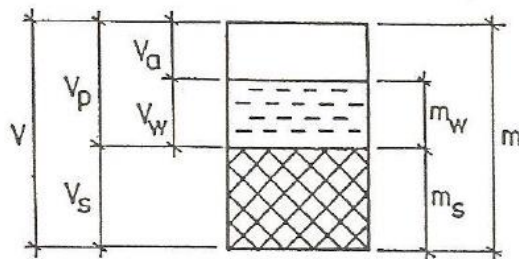
Číslo či index stlačitelnosti C_c se vypočte ze závislosti čísla pórovitosti e na svislém efektivním napětí σ'_a (Obr. 21). Číslo pórovitosti e je definováno vztahem

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{n}{1 - n} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (4.1)$$

kde V_p je objem pórů a V_s je objem skeletu (pevných částic) vzorku zeminy (Obr. 20), n je pórovitost, ρ_s je hustota pevných částic (měrná hmotnost) a ρ_d je objemová hmotnost vysušené zeminy.

Pro potřeby vyhodnocení se ovšem používá vztah

$$e = v - 1 \quad (4.2)$$



Obr. 20 Trojfázový model zeminy (Fyzikálně indexové vlastnosti zemín, BF002, podklady do cvičení, 2020)

pomocí kterého vypočteme číslo pórovitosti kdykoli v průběhu zkoušky, kde v je specifický objem v průběhu zkoušky, pro který platí

$$v = \frac{V}{V_s} \quad (4.3)$$

kde V je objem v průběhu zkoušky a V_s je objem pevné fáze zeminy ve vzorku na konci zkoušky, pro který platí

$$V_s = \frac{V_f}{v_f} \quad (4.4)$$

kde V_f je objem vzorku na konci zkoušky a v_f je specifický objem zeminy na konci zkoušky, pro které platí

$$V_f = \frac{\pi d^2}{4} (h_0 - s_{a,f}) \quad (4.5)$$

$$v_f = 1 + e_f \quad (4.6)$$

kde d je průměr vzorku, h_0 je původní výška vzorku, $s_{a,f}$ je stlačení na konci zkoušky, e_f je číslo pórovitosti vzorku zeminy na konci zkoušky, pro které platí

$$e_f = w_f * G_s \quad (4.7)$$

kde w_f je vlhkost vzorku zeminy na konci edometrické zkoušky a G_s je specifická hmotnost pevné fáze zeminy, pro kterou platí

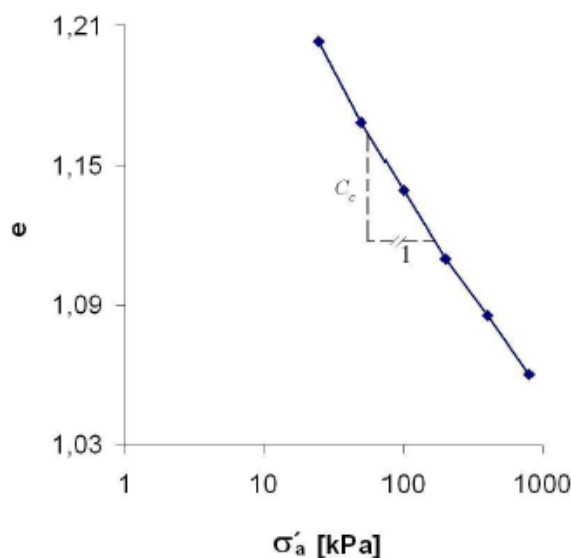
$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (4.8)$$

kde ρ_w je hustota vody.

Pro číslo stlačitelnosti C_c^* platí vztah

$$C_c^* = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_a} \quad (4.9)$$

kde Δ značí přírůstky resp. úbytky veličin.

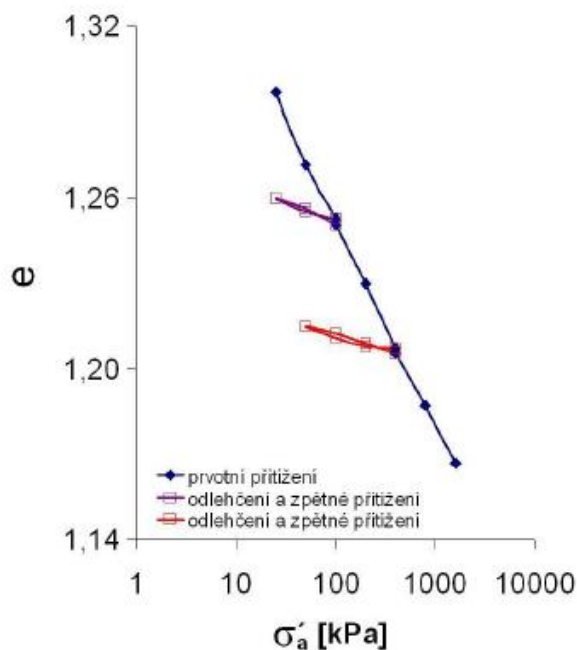


Obr. 21 Závislost čísla pórovitosti e na svislém efektivním napětí σ'_a (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)

Číslo stlačitelnosti C_c^* jsem označil hvězdičkou jelikož bude zjištěno na rekonstituovaném jílu vytvořeným způsobem dle Burlanda (1990) a je tedy vnitřním číslem stlačitelnosti. Tento parametr je pro danou zeminu konstantou jelikož průběh edometrické zkoušky v zobrazení závislosti e na $\log \sigma'_a$ vytvoří přímku.

Na Obr. 22 můžeme vidět případ trojího přitížení a dvojího odtížení vzorku zeminy. Tzv. křivka prvotního přitížení je pro každou zeminu unikátní. Dráha odtížení a zpětného přitížení je identická a z grafů je zřejmé, že zemina vykazuje větší tuhost než při prvotním zatížení. Také vidíme, že deformace je nevratná.

Křivka prvotního přitížení se u zemin obecně označuje jako NCL („normal compression line“) tedy linie normálního stlačení. V mém případě linii nazvu ICL. Stav nad ICL je fyzikálně nemožný, stav pod ICL vykazuje překonsolidaci. Stav zeminy na křivce odlehčení je tedy překonsolidovaný.

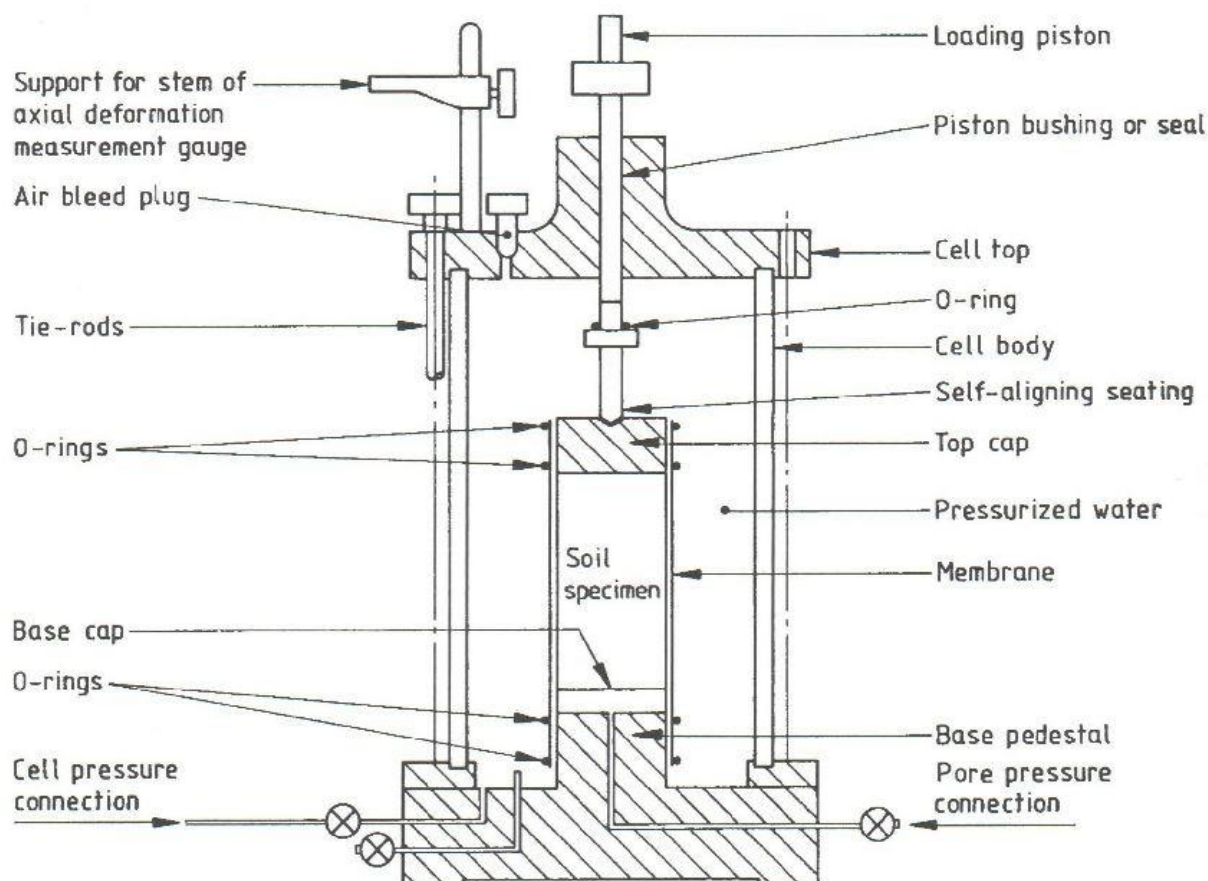


Obr. 22 Příklad závislosti čísla pórovitosti e na efektivním napětí $\log \sigma'_a$ pro trojí přitížení a dvojí odlehčení (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)

4.3.3 Triaxiální zkouška smykové pevnosti

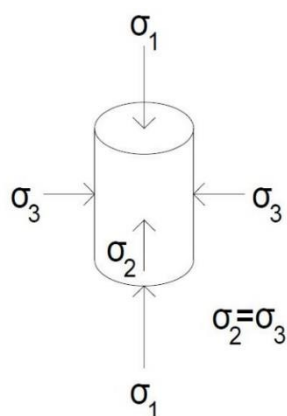
Triaxiální zkouškou se zjišťuje smyková pevnost zeminy. Jedná se o trojosé podmínky napjatosti a přetvoření. Válcový vzorek, obvykle o výšce 76 mm a průměru 38 mm, je umístěn v triaxiální komoře (Obr. 23). Komoře je naplněna vodou, kterou se vyvozuje horizontální tlak na vzorek zeminy, který je obalen nepropustnou membránou a na jeho dolní i vrchní podstavě jsou pórézní destičky. Opět je možné umístit z obou stran vzorku filtrační papír, aby se destičky nezanášely vyplavovanou zeminou. Vertikální (axiální) napětí je vnášeno do vzorku pomocí tyče, která je součástí zatěžovacího rámu. Na rámu je umístěn snímač vertikálního napětí „load cell” a také snímač měřící posuny (stlačení). Komoře je ventilem připojena k pumpě, která reguluje napětí v komoře. Dále je na komoře umístěn sytící ventil, vedoucí do druhé pumpy, který umožňuje proudění vody ze vzorku. Aktuální napětí vody v komoře i pórových tlaků ve vzorku je tedy řízeno, měřeno a zaznamenáváno.

Sytící ventil může být buď zavřen a bránit drenáži vody ze vzorku nebo otevřen. Obecně má triaxiální zkouška tři fáze. Je nezbytné, aby byl vzorek v průběhu testování plně nasycen, proto je první fází saturace vzorku, na jejímž konci je stupeň nasycení $S_r=1$. Druhou fází je konsolidace, při které je komorový tlak zvyšován a vzniká tedy menší z hlavních napětí σ_3 (omezující napětí). Při této fázi je buď konsolidace vzorku povolena nebo je jí zamezeno, záleží na typu zkoušky. Třetí fází je smýkání. V této etapě se vzorek vertikálně zatíží a vzniká větší z hlavních napětí σ_1 . Napětí σ_1 a σ_3 jsou hlavní napětí, protože na podstavách ani bocích vzorku nevzniká napětí smykové.



Obr. 23 Schéma triaxiální komory (upraveno) (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990)

Schéma působení hlavních napětí vidíme na Obr. 24. Vertikální napětí σ_1 se postupně zvyšuje dokud není dosaženo pevnosti zeminy.



Obr. 24 Hlavní napětí na vzorku v triaxiální komoře

Je několik typů triaxiální zkoušky, které se rozlišují v závislosti na tom, zda je povolena drenáž ve fázi konsolidace a ve fázi smýkání. Pokud je ve fázi konsolidace sytící ventil zavřen, tak se jedná o neodvodněné podmínky. Tento test je nekonsolidovaný a značí se U („unconsolidated”). Jelikož je

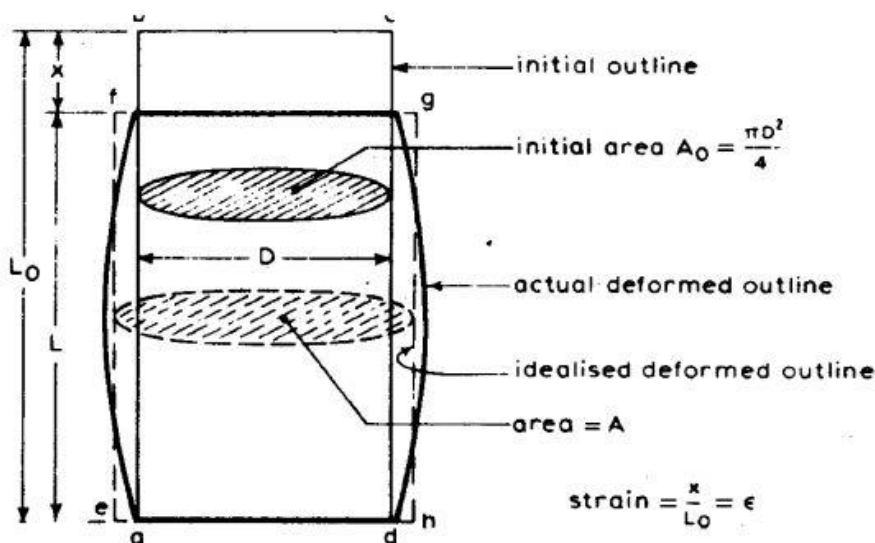
drenáž znemožněna a vzorek plně nasycen, tak dojde ke zvyšování pórových tlaků. Pokud je ventil otevřen, máme konsolidované podmínky a ty značíme C („consolidated“). V tomto případě se budou pórové tlaky disipovat a ve vzorku může dojít k objemovým změnám.

Ve fázi smýkání může být sytící ventil také otevřen či zavřen. Pokud je otevřen, jedná se o odvodněné podmínky a používáme pro tento test značení D („drained“). Za těchto podmínek nevznikají ve fázi smýkání pórové tlaky ve vzorku za předpokladu pomalého průběhu zkoušky, který zajistí, že pórové tlaky mají čas na disipaci. To je obzvláště důležité u zemin s malou propustností jako je např. jíla. Pokud je při smýkání ventil zavřen, jedná se o neodvodněné podmínky a tento test se značí U („undrained“). V tomto případě nedojde k objemovým změnám ve vzorku a budou vznikat pórové tlaky.

Ke značení typů triaxiálních zkoušek se používá dvoupísmenné označení. První písmeno definuje fázi konsolidace a druhé fázi smýkání. Existují tedy typy UU, CD, CU. Zkouška typu UU se značí také Q („quick“), jelikož je rychlá a prakticky simuluje okamžitou stabilitu. Zkouška typu CD se značí také S („slow“), jelikož zabere množství času a prakticky simuluje dlouhodobé podmínky zatížení. Zkouška typu CU se může značit také R a je rychlejší než zkouška CD a pomalejší než UU. Podrobněji popíši zkoušku CU.

4.3.3.1 Triaxiální zkouška typu CU

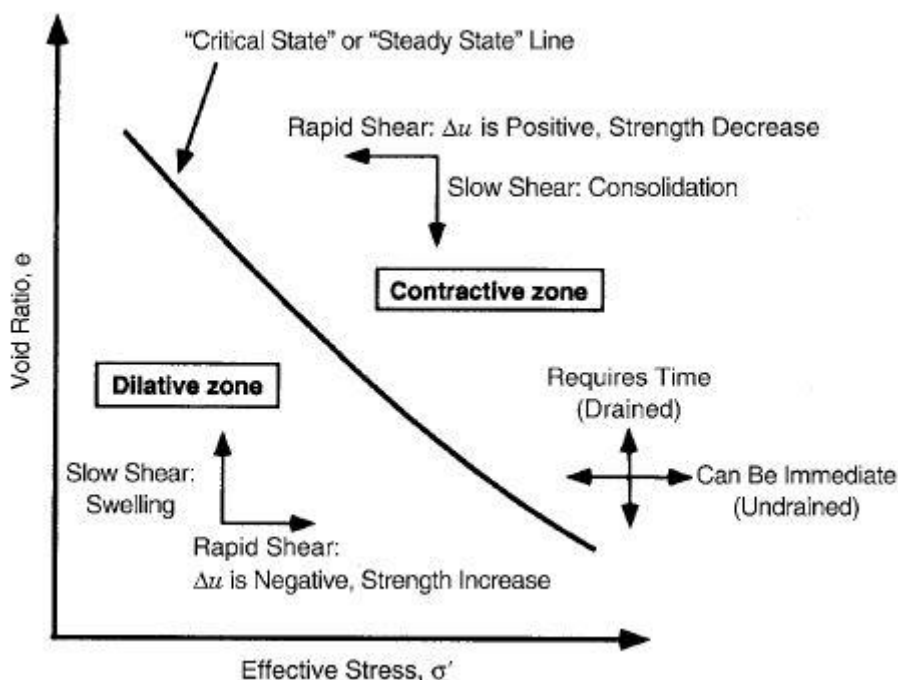
Tato zkouška se v ČR nazývá také CIUP (konsolidovaná izotropně, neodvodněná s měřením pórového tlaku). Tento test prakticky simuluje odtížení či přitížení již konsolidované zeminy. V případě této zkoušky tedy sytící ventil zůstává otevřen v průběhu konsolidační fáze, dokud nedojde k disipaci pórových tlaků a je nastolen rovnovážný stav ($\sigma' = \sigma$). Potom je sytící ventil zavřen a vytvoříme tedy neodvodněné podmínky v průběhu fáze smýkání. V průběhu smýkací fáze měříme pórové tlaky uvnitř



Obr. 25 Změna tvaru a průřezové plochy vzorku (Smyková pevnost zemin, BF002, podklady do cvičení, 2019)

vzorku. Smýkání je rychlé a v jeho průběhu objem vzorku zůstane konstantní, ale bude se zvětšovat průřezová plocha vzorku (Obr. 25).

Pórový tlak ve vzorku generovaný při této zkoušce může být pozitivní či negativní. Tato skutečnost závisí na chování zeminy, které může být kontraktantní nebo dilatantní. Dilatantní zeminy⁴ mají tendenci svůj objem zvětšovat, kontraktantní⁵ zmenšovat. Jelikož se však objem vzorku nemění, tak se tyto tendence projeví změnou pórového tlaku. Kontraktantní zeminy vyvolají pozitivní a dilatantní zase negativní pórový tlak (podtlak) (Obr. 26).



Obr. 26 Chování zemin při triaxiální kompresi v závislosti na kontraktanci a dilatanci (Mitchell & Soga, 2005)

Rekonstituované vzorky, které jsem použil, jsou normálně konsolidovány a předpokládám u nich kontraktantní chování.

V průběhu smýkání je totální komorové napětí σ_3 konstantní a totální napětí σ_1 narůstá až do porušení. Jelikož je zaznamenáván průběh pórového napětí, můžeme určit efektivní napětí σ'_3 a σ'_1 .

⁴ Překonsolidované zeminy, ulehle písky

⁵ Normálně konsolidované zeminy, kypré písky



Obr. 27 Vzorek po ukončení zkoušky a rozebrání komory – tvarem připomíná soudek

4.3.3.2 Vyhodnocení CU zkoušky

Pro deviator napětí ve vzorku q platí

$$q = \frac{P_z}{A} \quad (4.10)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.11)$$

$$q = q' \quad (4.12)$$

kde P_z je vertikální síla a A je aktuální průřezová plocha vzorku. Totální deviator je roven efektivnímu. Aktuální průřezová plocha vzorku se vypočte jako

$$A = \frac{A_0 * (1 - \varepsilon_v)}{1 - \varepsilon_1} \quad (4.13)$$

kde A_0 je počáteční plocha vzorku, ε_v je poměrné objemové přetvoření (pro zkoušku CU $\varepsilon_v=0$) a ε_l je poměrné osové přetvoření, pro které platí

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{L_0} \quad (4.14)$$

kde Δz je změna výšky vzorku a L_0 je původní výška vzorku. Pro totální hlavní napětí platí

$$\sigma_1 = q + \sigma_3 \quad (4.15)$$

Pro totální střední napětí p platí

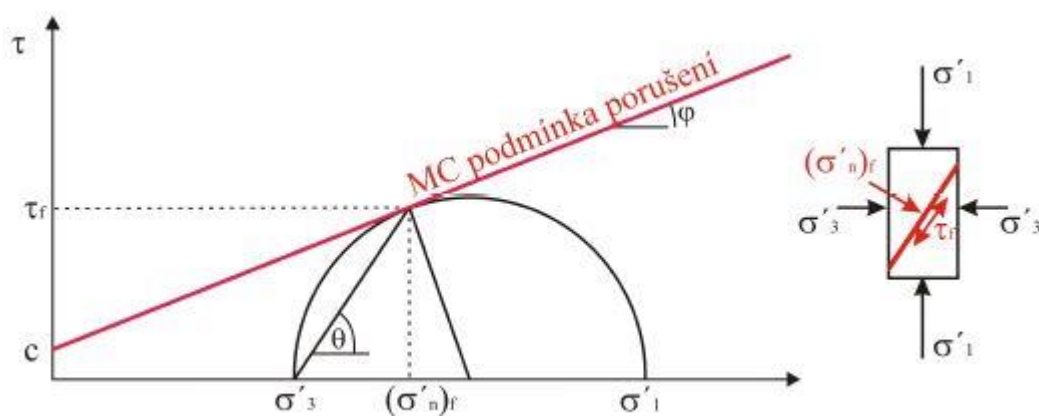
$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (4.16)$$

Efektivní střední napětí p' se vypočte jako

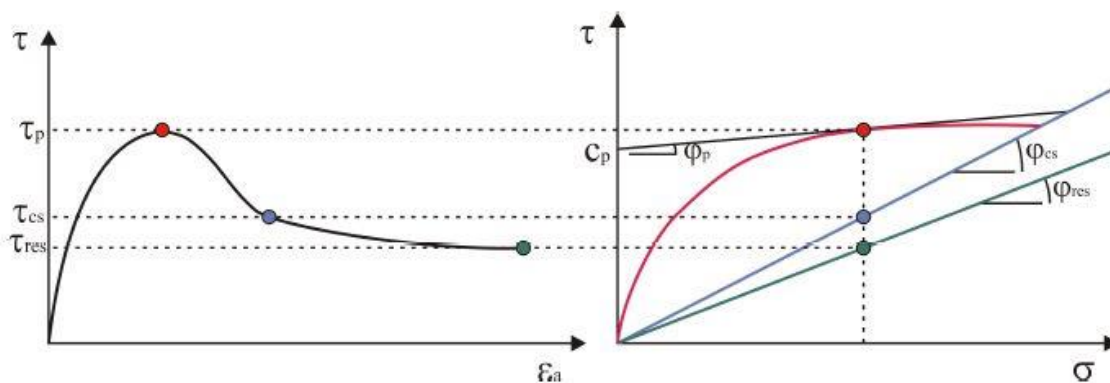
$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (4.17)$$

$$p' = p - u \quad (4.18)$$

Pevnost se vypočte z Mohr-Coulombova modelu porušení (Obr. 28). Vidíme, že MC linie porušení je definována soudržností c a sklonem, který je dán úhlem φ , což je úhel vnitřního tření. Mohrova kružnice je definována body σ'_3 a σ'_1 . Na konci zkoušky je dosaženo kritického stavu a zjistíme tedy kritickou pevnost φ^*_{cs} , která je pro danou zeminu konstantou (Obr. 29).



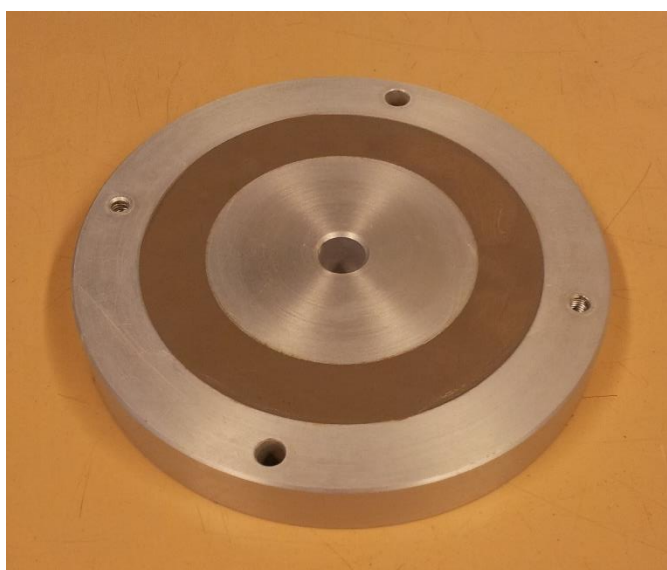
Obr. 28 Mohr-Coulombova podmínka porušení (Smyková pevnost zemin, BF002, podklady do cvičení, 2019)



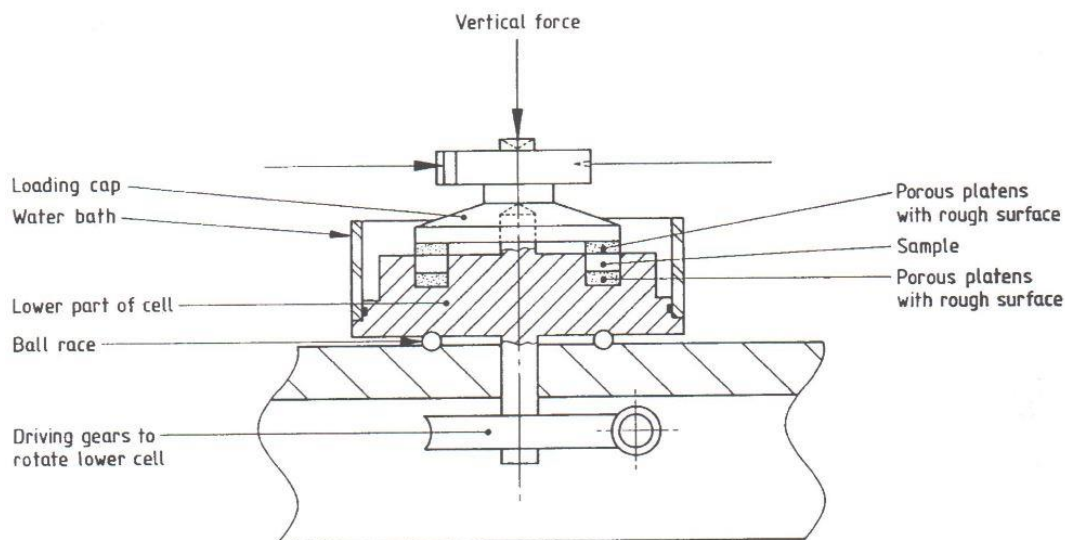
Obr. 29 Průběhy smykového napětí τ v závislosti na přetvoření ϵ a normálovém napětí σ . Červená – vrcholová pevnost, modrá – kritická pevnost, zelená – residuální pevnost (Smyková pevnost zemín, BF002, podklady do cvičení, 2019)

4.3.4 Rotační krabicová zkouška smykové pevnosti

Rotační krabicová zkouška slouží ke zjištění smykové pevnosti zeminy. Široce používaný je stroj typu Bromhead, který se používá na měření odvozněné residuální pevnosti jílu (Obr. 29). Vzorek má prstencový tvar, vnitřní poloměr je 70 mm a vnější 100 mm. Tloušťka vzorku je 5 mm. Instaluje se do desky kruhového tvaru, která se ukládá do plexisklové nádržky. Odvodnění zajišťují dvě bronzové destičky, z nichž jedna je součástí spodní desky a druhá je součástí desky horní, která se umísťuje na horní povrch vzorku. Porézní destičky mají zdrsňený povrch. Zemina je radiálně zajištěna stěnami spodní desky. Spodní deska je zajištěna dvěma šrouby. Plexisklová nádržka je v průběhu zkoušky zalita vodou. Příčný řez a půdorys strojem jsou znázorněny na obrázcích Obr. 31 a Obr. 32.

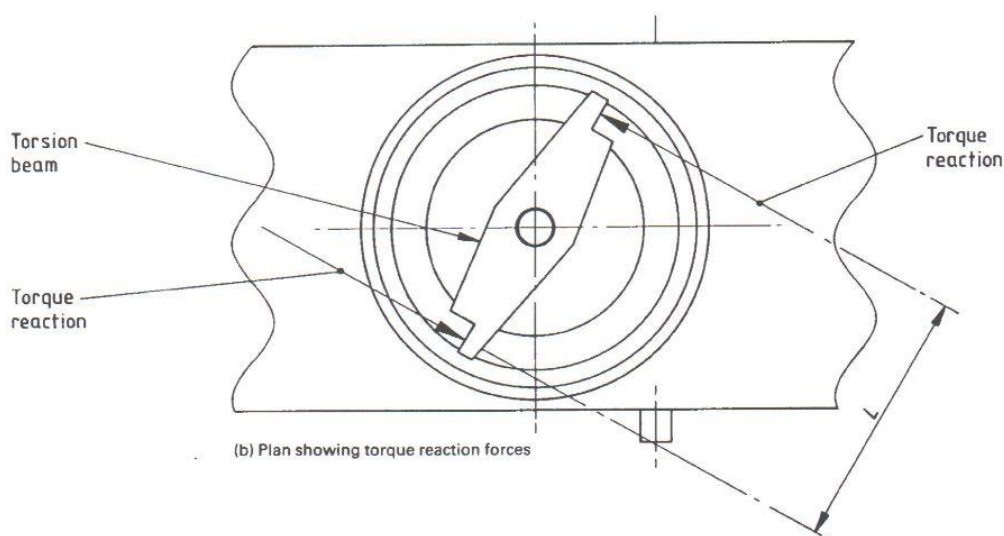


Obr. 30 Vzorek v kovové desce před zkouškou



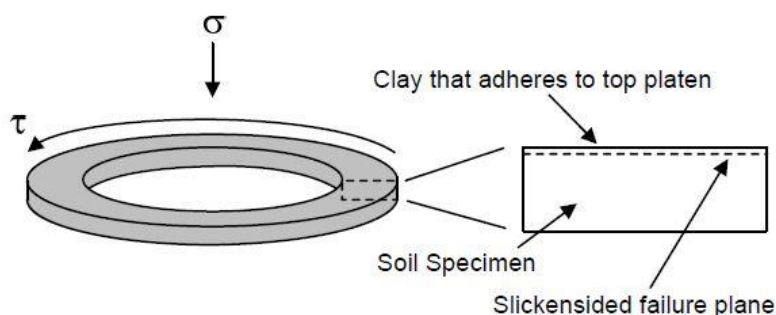
Obr. 31 Typické uspořádání kruhového stroje v příčném řezu (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990)

Na vzorek je vyvozováno normálové napětí σ pomocí pákového mechanismu. Závaží o hmotnosti 250 g působí na plochu vzorku napětím 5 kPa. Závaží se přidává po krocích, během nichž probíhá konsolidace. V průběhu přitěžování je měřen vertikální posun horní desky čili zatlačení do vzorku. Samotné smýkání probíhá za $\sigma = \text{konst.}$ Smykové napětí se vytvoří pomocí rotačního pohybu spodní části krabice, zatímco horní deska zůstává na místě díky působení dvojice sil (Obr. 31 a Obr. 32). Během smýkání jsou měřeny hodnoty těchto sil reagujících na rotaci spodní části krabice. Rychlost smýkání se musí zvolit tak, aby nedocházelo ke vzniku pórových tlaků a jednalo se tedy o odvodněné podmínky.



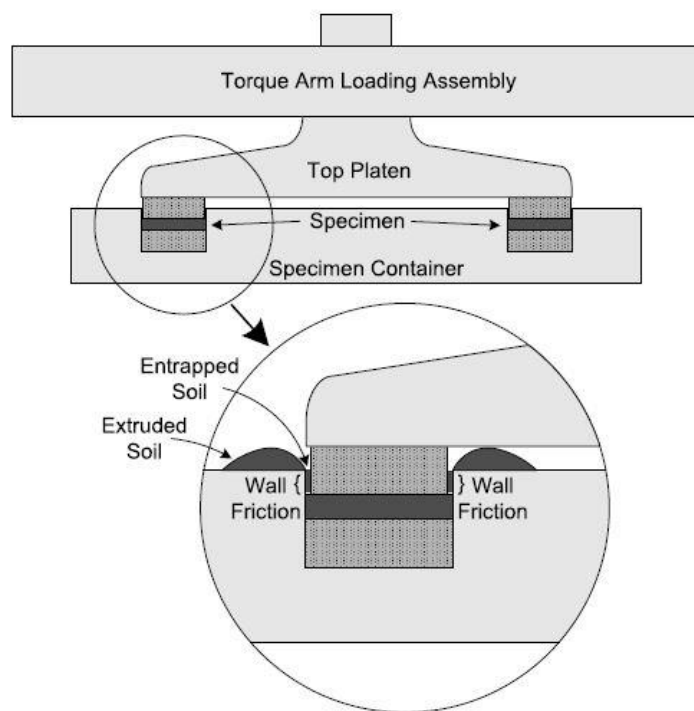
Obr. 32 Typické uspořádání kruhového stroje v půdorysu (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990)

Smyková plocha vzniká blízko povrchu horní desky. Během smýkání se za velkých přetvoření částice v jílu reorientují do směru smýkání a vytvoří se plocha, podél které se změří residuální pevnost (Obr. 33) (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007).



Obr. 33 Vznik smykové plochy v rotačním stroji Bromhead (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007)

Jedním z problémů, které mohou výsledek zkoušky ovlivnit, je tření mezi zeminou a stěnami horní a spodní desky. Toto je znázorněno na Obr. 34. Jak se horní deska zatlačí do vzorku, tak vytlačí část zeminy. Tření způsobuje přídavný odpor a naměřená pevnost potom může být vyšší než skutečná. Bylo zjištěno, že pokud je zatlačení desky do vzorku menší než 0,75 mm, tak zkouška dává reálné výsledky (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007).



Obr. 34 Vznik tření vlivem zatlačení horní desky do vzorku (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007)

Zatlačení se také dá redukovat tak, že potom, co je konsolidace ukončena, přidá se na vzorek další zemina, která vzorek navýší na původní tloušťku. Účelem je nedopustit zatlačení více než 0,75 mm.

Potom je vzorek znovu konsolidován. Tomuto postupu se říká „flush” metoda, která je ovšem časově náročná (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007).

Délka zkoušky v rotačním přístroji Bromhead je v součtu s konsolidační fází kolem dvou týdnů, v závislosti na zvoleném normálovém napětí, kterého chceme dosáhnout. Konsolidační fáze zabere většinu tohoto času, smýkání potom kolem dvou dnů.

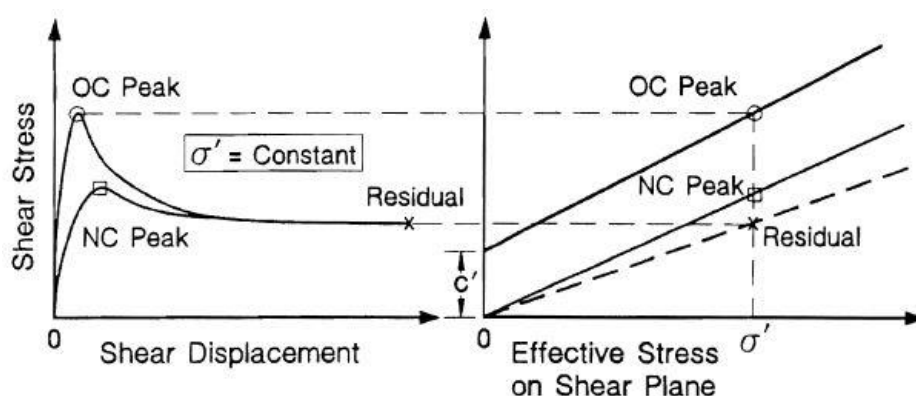
4.3.4.1 Vyhodnocení residuální pevnosti z rotační smykové zkoušky

Předpokladem výpočtu je, že koheze je nulová ($c' = 0$). Průměrné smykové napětí τ se vypočte jako

$$\tau = \frac{0,239 * (A + B) * L * 10^3}{(r_2^3 - r_1^3)} \quad (4.19)$$

kde A a B jsou hodnoty sil v N , L je vzdálenost mezi dvojicí sil v mm , r_1 je vnitřní poloměr vzorku a r_2 je vnější poloměr vzorku v mm (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990).

Reziduální úhel vnitřního tření ϕ_{res}^* se stanoví z MC podmínky porušení. Grafické znázornění je na Obr. 35. Vidíme, že residuálního stavu je dosaženo za velkých posunutí (přetvoření).



Obr. 35 Odvodněná pevnost jílů pro překonsolidovanou a normálně konsolidovanou zeminu (Stark & Vettel, 1992)

5 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

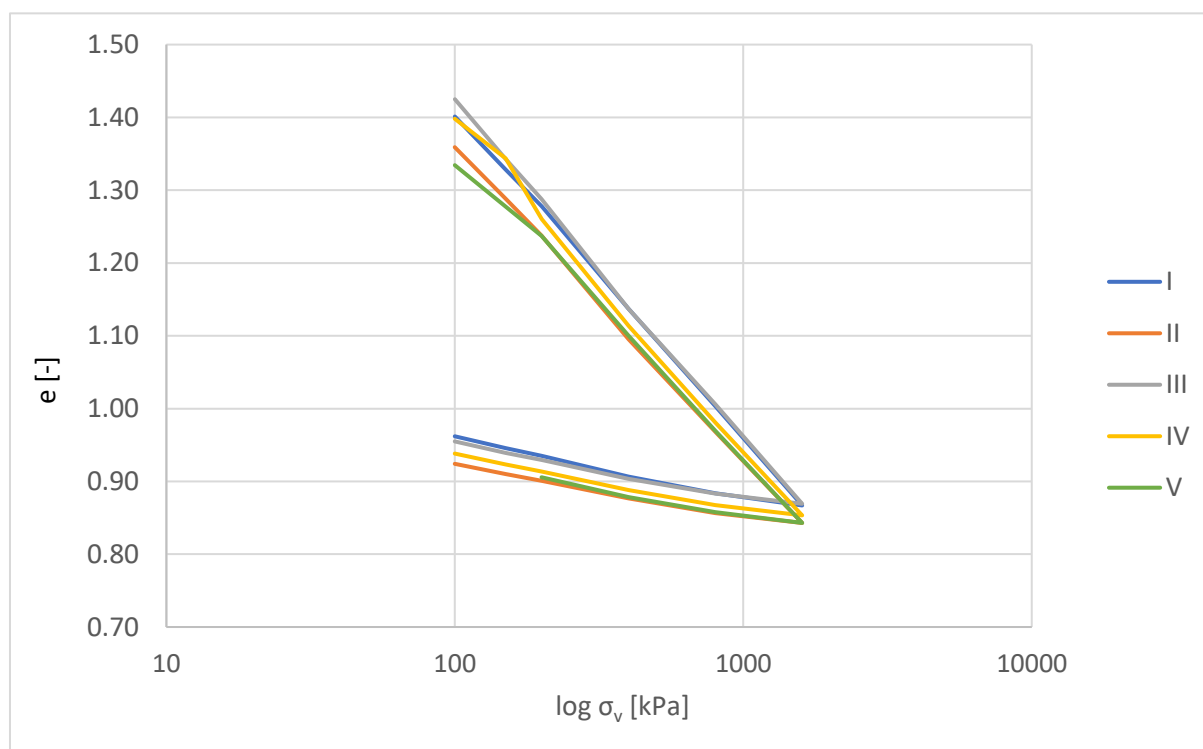
5.1 Zkoušky stlačitelnosti

Bylo provedeno pět edometrických zkoušek. Čtyři zkoušky, které byly provedeny v laboratoři centra AdMaS, proběhly v krocích 100-150 kPa, 150-200 kPa, 200-400 kPa, 400-800 kPa, 800-1600 kPa a potom následovalo odtížení po stejných krocích zpět na 100 kPa. Každé zkoušce předcházela fáze rekonsolidace, kdy se vzorek zatížil na 80 kPa, odtížil na 20 kPa a potom znovu přitížil na 80 kPa a sledoval jsem, zda rozdíl přetvoření způsobeného přitížením nepřesáhne 0,3 %. Pokud byla tato podmínka splněna, zkouška mohla začít. Napětí 80 kPa působilo po dobu 22 hodin a napětí 20 kPa po dobu 2 hodin. Pouze při první zkoušce bylo třeba rekonsolidační fázi opakovat.

Pátá zkouška proběhla v laboratoři ústavu geotechniky FAST ve starším mechanickém edometru v krocích 100-200 kPa, 200-400 kPa, 400-800 kPa, 800-1600 kPa a potom následovalo odtížení po stejných krocích na 200 kPa.

Každý zatěžovací krok trval vždy 24 hodin.

Grafické vyhodnocení zkoušek v zobrazení e vs. $\log \sigma_v$ je na Obr. 36.



Obr. 36 Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost e vs. $\log \sigma_v$

Grafy jednotlivých zkoušek jsou k nalezení v přílohách.

V následující tabulce (Tab. 3) vidíme vypočtené vnitřní konstanty stlačitelnosti. Vnitřní číslo stlačitelnosti C_c^* je vypočteno dle rovnice (4.9). Vnitřní číslo pórovitosti e_{100}^* je vypočteno pomocí rovnice (4.2). V posledním řádku tabulky je vypočteno C_{cr}^* , což je obdoba C_c^* pro větev odtížení.

| ČÍSLO ZKOUŠKY | I | II | III | IV | V | PRŮMĚR |
|---------------|------|------|------|------|------|--------|
| C_c^* | 0.44 | 0.43 | 0.46 | 0.45 | 0.41 | 0.44 |
| e_{100}^* | 1.40 | 1.36 | 1.42 | 1.40 | 1.33 | 1.38 |
| C_{cr}^* | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |

Tab. 3 Vnitřní konstanty stlačitelnosti C_c^* , e_{100}^* a C_{cr}^*

Výsledné hodnoty tedy jsou $C_c^*=0,44$, $e_{100}^*=1,38$ a $C_{cr}^*=0,07$. Výsledky můžu porovnat s několika daty z Burland (1990) (Obr. 37).

Table 1. Intrinsic constants of compressibility for reconstituted natural clays

| Soil | w_L | w_p | G_s | e_L | e_{100}^* | C_c^* | Reference |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|---------|------------------------------|
| Lower Cromer Till | 25 | 13 | 2.65 | 0.663 | 0.503 | 0.154 | Gens (1982) |
| Boulder clay | 28 | 14 | 2.69 | 0.753 | 0.52 | 0.12 | Skempton (1944) |
| Silty clay | 28 | 20 | 2.72 | 0.762 | 0.603 | 0.136 | Ramiah (1959) |
| Magnus Clay | 35 | 17.2 | 2.73 | 0.956 | 0.76 | 0.27 | Jardine (1985) |
| Grangemouth | 35 | 21 | 2.78 | 0.973 | 0.659 | 0.229 | This study |
| Ton V | 36 | 18 | 2.71 | 0.976 | 0.74 | 0.25 | Skempton (1944) |
| Weald clay | 39 | 19 | 2.73 | 1.065 | 0.77 | 0.24 | Skempton (1944) |
| Boston blue clay | 39 | 23 | 2.78 | 1.084 | 0.80 | 0.21 | Skempton (1944) |
| Red soil | 45.3 | 22 | 2.667 | 1.208 | 0.785 | 0.27 | Nagaraj <i>et al.</i> (1986) |
| River Severn alluvium | 46 | 25 | 2.59 | 1.191 | 0.80 | 0.21 | Skempton (1944) |
| Wiener Tegel | 46.7 | 22 | 2.76 | 1.288 | 0.859 | 0.297 | Hvorslev (1937) |
| Oxford clay | 53 | 27 | 2.57 | 1.362 | 0.96 | 0.30 | Skempton (1944) |
| Ton IV | 58 | 26 | 2.85 | 1.653 | 0.97 | 0.32 | Skempton (1944) |
| Residual clay | 58 | 27 | 2.74 | 1.589 | 1.024 | 0.337 | Ramiah (1959) |
| London Clay | 62.3 | 24.3 | 2.73 | 1.707 | 1.200 | 0.446 | Jardine (1985) |
| Belfast estuarine clay | 67 | 30 | 2.66 | 1.782 | 1.00 | 0.32 | Skempton (1944) |
| London Clay | 67.5 | 26.5 | 2.71 | 1.829 | 1.227 | 0.494 | Som (1968) |
| Ganges delta clay | 69 | 28 | 2.77 | 1.911 | 1.22 | 0.42 | Skempton (1944) |
| Gosport clay | 76 | 29 | 2.67 | 2.029 | 1.20 | 0.48 | Skempton (1944) |
| London Clay | 77 | 28 | 2.71 | 2.087 | 1.28 | 0.49 | Skempton (1944) |
| Brown London Clay | 88 | 32 | 2.65 | 2.332 | 1.32 | 0.56 | Skempton (1944) |
| Black cotton clay | 97.3 | 32 | 2.73 | 2.656 | 1.744 | 0.69 | Nagaraj <i>et al.</i> (1986) |
| Kleinbelt Ton | 127 | 36 | 2.77 | 3.518 | 2.18 | 0.91 | Hvorslev (1937) |
| Argile plastique | 128 | 31 | 2.58 | 3.302 | 1.82 | 0.81 | Skempton (1944) |
| Whangamarino clay | 136 | 61 | 2.78 | 3.74 | 2.44 | 0.797 | Newland & Allely (1956) |
| SAIL | 159.3 | 46 | 2.826 | 4.443 | 2.769 | 1.05 | Nagaraj <i>et al.</i> (1986) |

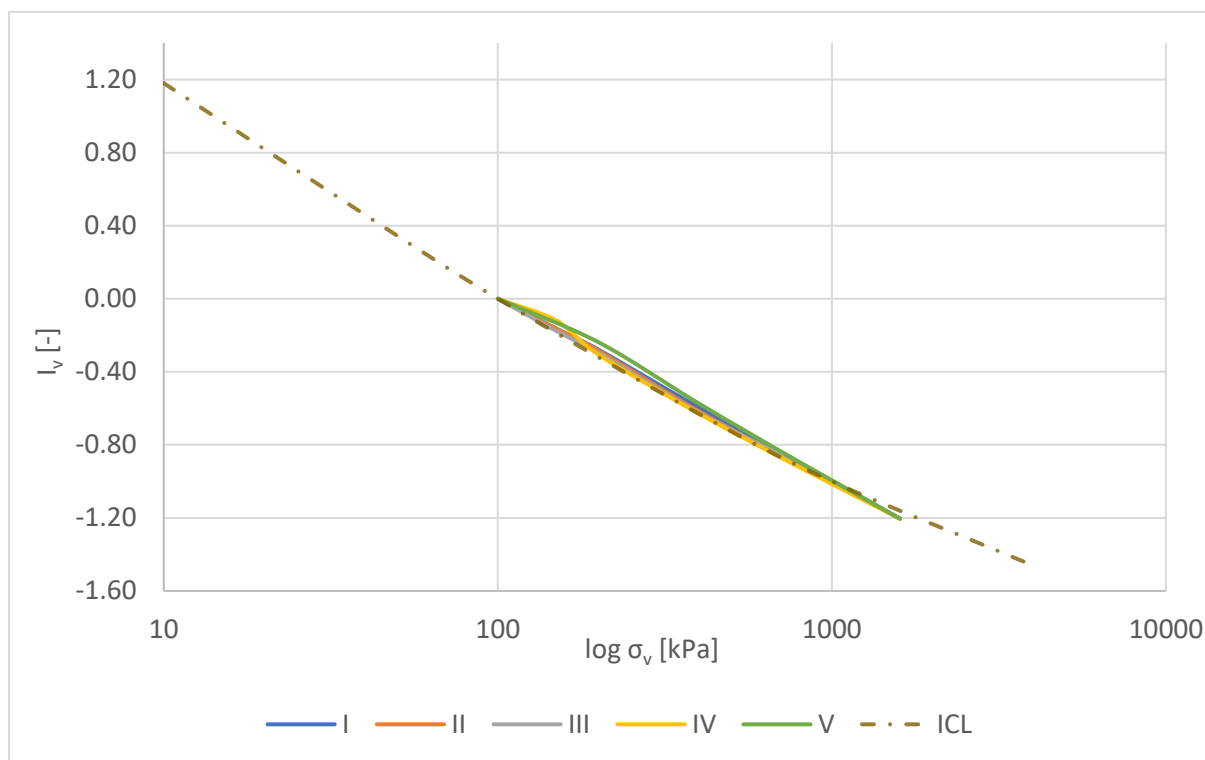
Obr. 37 Tabulka vnitřních konstant stlačitelnosti rekonstituovaných jílu (Burland, 1990)

Vidíme zde několik podobných hodnot. Dle vnitřního indexu stlačitelnosti C_c^* je zde největší shoda s londýnským jílem od Jardine (1985) a poměrně překvapivě s jílem z delty řeky Gangy od Skempton (1944). Dle vnitřního čísla pórovitosti e_{100}^* je nejbližší hodnota znovu pro zeminu z Londýna, a to pro „hnědý” londýnský jíl od Skempton (1944).

Další částí vyhodnocení edometrické zkoušky bylo stanovení Burlandova indexu pórovitosti I_v pro linii přitěžování a vynesení grafu I_v vs. $\log \sigma_v$. Index pórovitosti jsem vypočetl pomocí rovnice (3.1).

Vnitřní linii stlačitelnosti ICL jsem sestrojil pomocí souřadnic daných Burlandem (Obr. 6).

Grafické vyhodnocení zkoušek v zobrazení I_v vs. $\log \sigma_v$ je na Obr. 38.



Obr. 38 Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost I_v vs. $\log \sigma_v$

Grafy jednotlivých zkoušek jsou k nalezení v přílohách ve větším rozlišení.

Podle Burlanda by se křivky stlačitelnosti rekonstituovaného jílu měly chovat dle linie ICL. Vidíme, že všechny křivky opravdu leží v blízkosti ICL. Pro napětí 100 až 1000 kPa jsou průběhy mírně nad čarou ICL. Pro napětí vyšší než 1000 kPa se mírně odklánějí směrem dolů. Pro nižší hodnoty napětí tedy moje vzorky jílu vykazují mírně vyšší index pórovitosti než linie ICL a dle Burlandovi definice této veličiny to znamená nižší kompaktnost zeminy. Pro vyšší hodnoty napětí (>1000 kPa) pozorujeme mírně nižší index pórovitosti a to znamená vyšší kompaktnost zeminy.

Vedoucí této práce mi poskytl data k několika edometrickým zkouškám provedených na rekonstituovaném brněnském jílu v letech 2017 až 2019. První soubor dat, který jsem vyhodnotil patřil k jílu z Králova Pole. Jednalo se o osm edometrických zkoušek. Příprava vzorku probíhala jednodušším způsobem než jaký jsem popisoval dříve. Nebylo použito konsolidačního válce a ke konsolidaci docházelo až v edometrické krabici. Postupy se lišily u zkoušek I-V a VI-VIII. Konkrétní zatěžovací kroky u zkoušek I-V byly 0-5 kPa, 5-10 kPa, 10-15 kPa, 15-25 kPa, 25-40 kPa, 40-60 kPa, 60-100 kPa, 100-150 kPa, 150-200 kPa, 200-400 kPa, 400-800 kPa, 800-1000 kPa. Fáze odtěžování se různila. U zkoušky I následovalo odtižení po stejných krocích až na hodnotu 100 kPa s vynecháním hodnoty 150 kPa. U zkoušek II-V také, ale u zkoušek II a III se ještě pokračovalo kroky 100-50 kPa, 50-25 kPa, 25-10 kPa, u zkoušky IV ještě přibyl krok 10-5 kPa, u zkoušky V se naopak

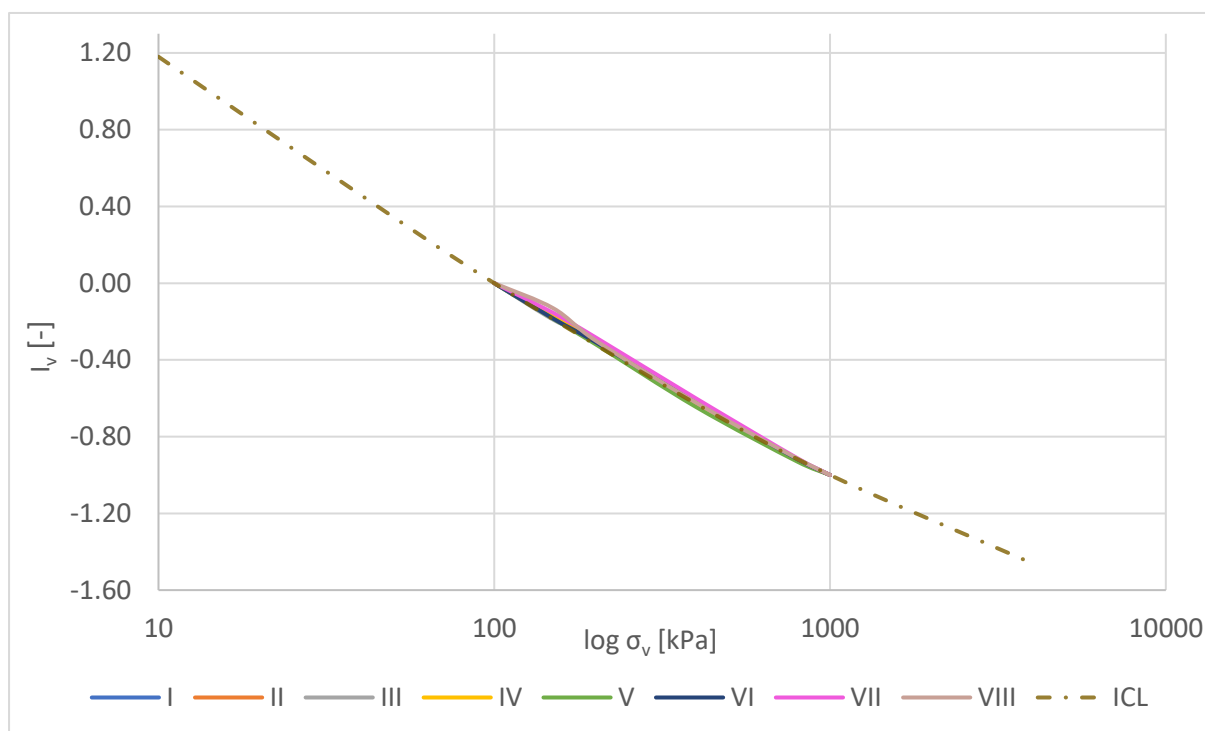
měření ukončila již při 25 kPa. U zkoušek VI-VIII se před započítím měření prováděla fáze rekonsolidace tak, jak jsem ji prováděl i já, tedy aplikování napětí 80 kPa, odtížení na 20 kPa a znovu přitížení na 80 kPa se sledováním rozdílu přetvoření. Jelikož pasta nebyla předem konsolidována a tedy nebyla tuhá, tak bylo třeba několik opakování. Poté zkoušky vždy probíhaly v krocích 100-150 kPa, 150-200 kPa, 200-400 kPa, 400-800 kPa, 800-1000 kPa a následovalo odtížení po stejných krocích na hodnotu 100 kPa.

V Tab. 4 vidíme průměrné vnitřní konstanty stlačitelnosti C_c^* , e_{100}^* a C_{cr}^* ze zkoušek I-VIII.

| PRŮMĚR ZE ZKOUŠEK | I-VIII |
|-------------------|--------|
| C_c^* | 0.47 |
| e_{100}^* | 1.41 |
| C_{cr}^* | 0.07 |

Tab. 4 Průměrné hodnoty konstant vnitřní stlačitelnosti pro rekonstituovaný jíl z Králova Pole

Tyto hodnoty jsou ve velmi dobré shodě s výsledky z Křenové. Dále jsem vyhodnotil průběh těchto zkoušek v zobrazení I_v vs. $\log \sigma_v$. Výsledek je na Obr. 39.



Obr. 39 Královo pole - Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost I_v vs. $\log \sigma_v$

Křivky všech osmi zkoušek probíhají dle linie ICL.

Dále mám k dispozici ještě data z dvou edometrických zkoušek provedených na rekonstituovaném jílu z ulice Leitnerova v Brně. Zkoušky z ulice Leitnerova byly první pokusy o testování rekonstituovaného jílu FAST VUT. Nebylo užito konsolidačního válce a ke konsolidaci

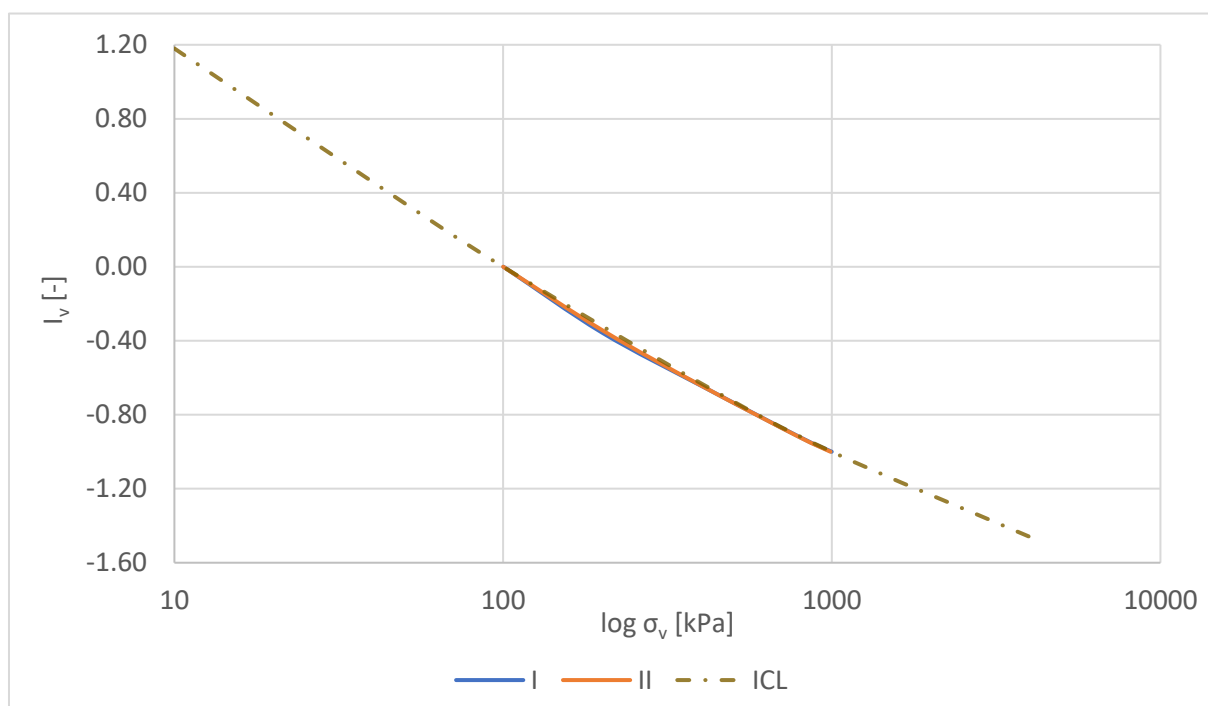
docházelo až v edometrické krabici. Zkouška I probíhala v krocích 0-15 kPa, 15-25 kPa, 25-40 kPa, 40-60 kPa, 60-100 kPa, 100-200 kPa, 200-400 kPa, 400-800 kPa, 800-1000 kPa. Odtěžování proběhlo po stejných krocích až na hodnotu 100 kPa. Zkouška II proběhla ve stejných krocích s přidáním kroku 0-10 kPa a 10-15 kPa.

V Tab. 5 vidíme průměrné vnitřní konstanty stlačitelnosti C_c^* , e_{100}^* a C_{cr}^* ze zkoušek I a II.

| PRŮMĚR ZE ZKOUŠEK | I a II |
|-------------------|--------|
| C_c^* | 0.27 |
| e_{100}^* | 0.67 |
| C_{cr}^* | 0.03 |

Tab. 5 Průměrné hodnoty konstant vnitřní stlačitelnosti pro rekonstituovaný jíl z ulice Leitnerova

Tyto hodnoty se značně odlišují od Křenové i Králova pole. Jíl z ulice Leitnerova totiž byl s podstatnou příměsí písku. Zajímavé ovšem je vyhodnocení průběhu těchto zkoušek v zobrazení I_v vs. $\log \sigma_v$. To vidíme na Obr. 40.



Obr. 40 Leitnerova - Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost I_v vs. $\log \sigma_v$

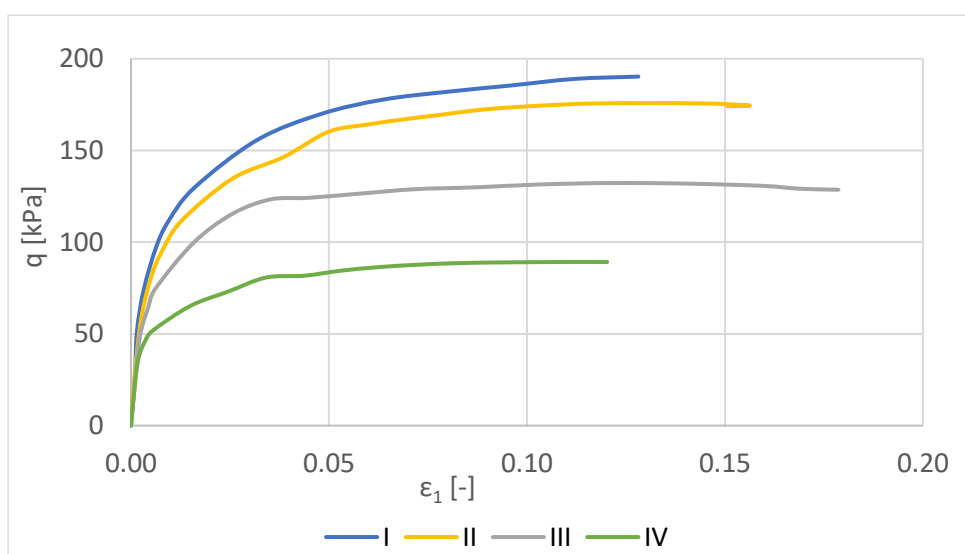
Křivky se v podstatě překrývají a obě kopírují průběh linie ICL. Konstanty vnitřní stlačitelnosti se od ostatních dvou lokalit tedy značně odlišují, ale stlačitelnostní chování stále kopíruje průběh ICL. Tato skutečnost potvrzuje univerzálnost této linie a obecnou platnost pro rekonstituované jíly.

5.2 Zkoušky smykové pevnosti

5.2.1 Triaxiální zkoušky

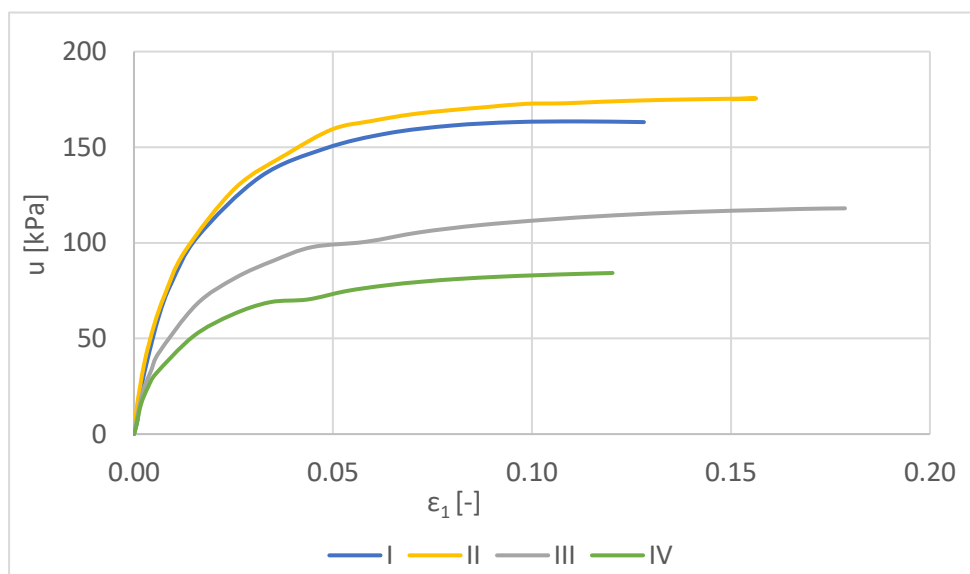
Byly provedeny čtyři triaxiální zkoušky typu CIUP. Komorový tlak pro fázi smýkání σ_3 byl u zkoušek I a II roven 700 kPa, u zkoušky III 600 kPa a u zkoušky IV 550 kPa. Pórový tlak u po fázi konsolidace byl vždy roven 400 kPa a efektivní napětí σ'_3 tedy bylo rovno 300 kPa (I, II), 200 kPa (III) a 150 kPa (IV). V průběhu zkoušky byl zaznamenáván nárůst deviátoru napětí q i pórového tlaku u a mohl jsem tedy dopočítat hodnoty napětí σ_I a σ'_I . Dále bylo zaznamenáváno osově přetvoření ε_I . Mohl jsem tedy vynést diagramy průběhu zkoušky q - ε_I , u - ε_I , q - p , p' a τ - σ' .

Na Obr. 41 vidíme závislost deviátoru napětí q na osovém přetvoření ε_I .



Obr. 41 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost q vs. ε_I

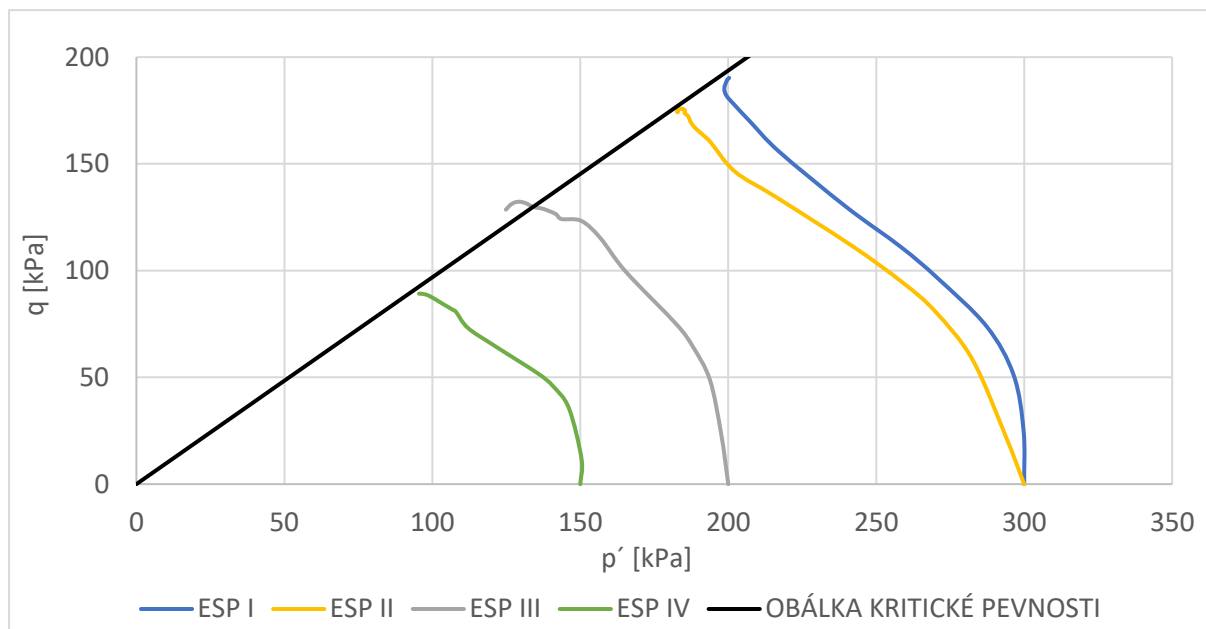
Na Obr. 42 vidíme závislost pórového napětí u na osovém přetvoření ε_I .



Obr. 42 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost u vs. ε_I

Vidíme, že na konci zkoušky mají deviátor q i pórový tlak u konstantní hodnotu. Bylo dosaženo kritického stavu a naměřená pevnost je tedy pevností kritickou.

Na Obr. 43 vidíme závislost deviátoru napětí q na efektivním středním napětí p' (efektivní dráhy napětí).



Obr. 43 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost q vs. p'

Vidíme zde několik skutečností. Je patrné kontraktantní chování zeminy. Linie TSP (totální dráhy napětí) v grafu nejsou, protože mají vždy sklon 3:1 (zobrazení TSP viz přílohy). Křivky ESP se od TSP odklání vlivem narůstajícího pórového tlaku a jsou tedy nelineární, jelikož pórový tlak se vyvíjí nelineárně (Obr. 42). Jakmile se křivka ESP dotkne MC obálky, dojde k porušení. MC linii jsem vykreslil na základě vztahu

$$\eta_f = \frac{6 * \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (5.1)$$

kde η_f je sklon linie porušení v zobrazení q - p' a φ je úhel vnitřního tření (Pietruszczak, 2010). Úhel vnitřního tření se dá vyjádřit z rovnice

$$\tau_f = c' + \sigma'_f * \tan \varphi' \quad (5.2)$$

kde τ_f je smykové napětí při porušení, σ'_f je jemu odpovídající normálové napětí a koheze $c' = 0$ (Obr. 28). Úhel vnitřního tření φ' se potom vyjádří jako

$$\varphi' = \tan^{-1} \frac{\tau_f}{\sigma'_f} \quad (5.3)$$

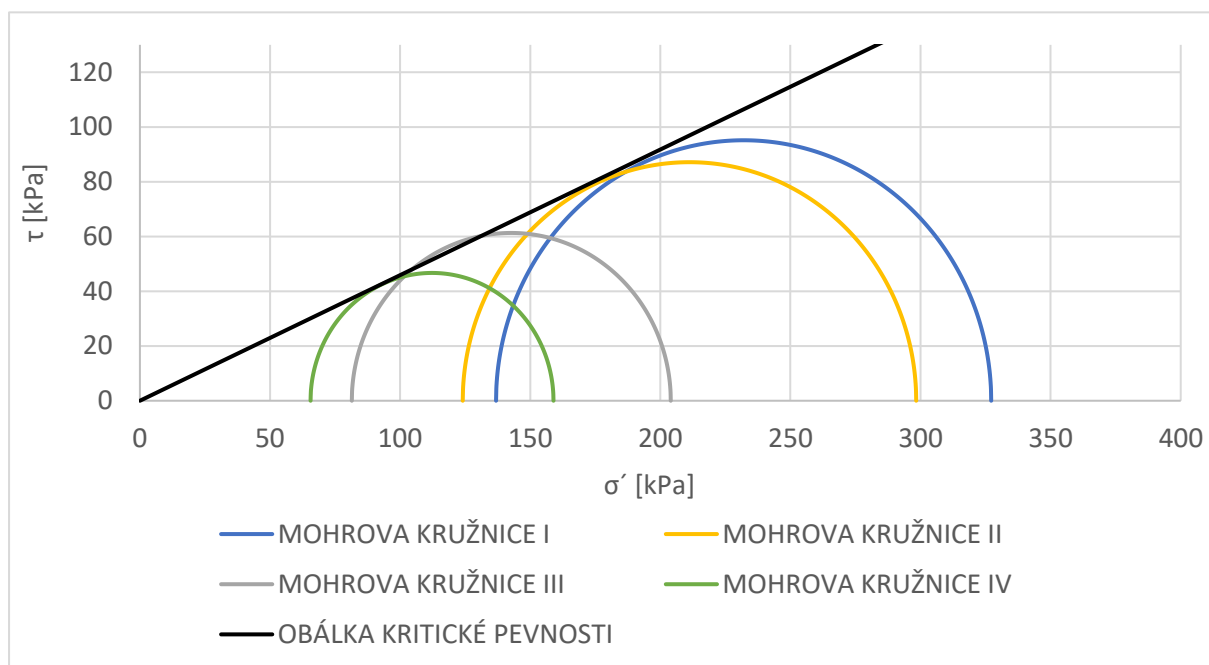
V následující tabulce (Tab. 6) jsou uspořádány vypočtené hodnoty sklonu MC linie η_f dle rovnice (5.1) a úhlu vnitřního tření φ_{cs}^* dle rovnice (5.3), který takto značíme, jelikož se jedná o kritický úhel vnitřního tření a zároveň o vnitřní vlastnost, jelikož materiálem je rekonstituovaný jíl.

| ČÍSLO ZKOUŠKY | I | II | III | IV | PRŮMĚR |
|---------------------------|------|------|------|------|--------|
| η_f | 0.95 | 0.96 | 1.00 | 0.97 | 0.97 |
| $\varphi_{cs}^* [^\circ]$ | 24.2 | 24.4 | 25.4 | 24.6 | 24.6 |

Tab. 6 Hodnoty sklonu MC linie η_f a vnitřního kritického úhlu tření φ_{cs}^*

Výsledný sklon kritické obálky pevnosti η_f použitý v Obr. 43 je tedy 0,97 a výsledný vnitřní kritický úhel tření φ_{cs}^* je 24,6°.

Na Obr. 44 je graf závislosti smykového napětí τ na efektivním normálovém napětí σ' . MC linie porušení má v tomto zobrazení sklon φ_{cs}^* . Mohrovy kružnice jsou definovány body σ'_1 a σ'_3 .



Obr. 44 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost τ vs. σ'

Jakmile se Mohrova kružnice dotkne obálky pevnosti, dojde k porušení.

Hodnoty vnitřního kritického úhlu φ_{cs}^* mohou porovnat s hodnotami od Fencla (2012). Fencel provedl tři triaxiální zkoušky rekonstituovaného téglu. Zemina byla odebrána v rámci geotechnického průzkumu pro VMO Dobrovského. Zkoušky I, II a III byly provedeny při efektivním komorovém tlaku 150, 200 a 300 kPa. Jeho výsledky jsou uspořádány v Tab. 7.

| ČÍSLO ZKOUŠKY | I | II | III |
|---------------------------|------|------|------|
| $\varphi_{cs}^* [^\circ]$ | 22.8 | 21.5 | 20.4 |

Tab. 7 Hodnoty kritické pevnosti rekonstituovaného brněnského téglu (Fencel, 2012)

Vidíme, že pevnost dle Fencle je mírně nižší než ta, kterou jsem naměřil já. Podle Fencle standartní triaxiální zkoušky mohou pevnost podhodnocovat. Dále vykonal čtyři zkoušky s použitím kluzných destiček, které by měly poskytnout přesnější výsledky (Tab. 8). Efektivní komorové tlaky u zkoušek I, II, III a IV byly 50, 150, 200, 300 kPa.

| ČÍSLO ZKOUŠKY | I | II | III | IV |
|----------------------|------|------|------|------|
| φ^*_{cs} [°] | 22.2 | 23.3 | 23.6 | 23.6 |

Tab. 8 Hodnoty kritické pevnosti rekonstituovaného brněnského téglu s použitím kluzných destiček (Fencl, 2012)

Tyto výsledky jsou ve větší shodě s mými. I já jsem používal kluzné destičky. Nicméně Fencl považuje nižší hodnoty za pravdivé, jelikož se shodují s prací Svobody (2010), který naměřil $\varphi^*_{cs}=18.9^\circ$ při vysokém komorovém tlaku 2550 kPa. Ten však upozorňuje, že jeho hodnota je zřejmě podhodnocena.

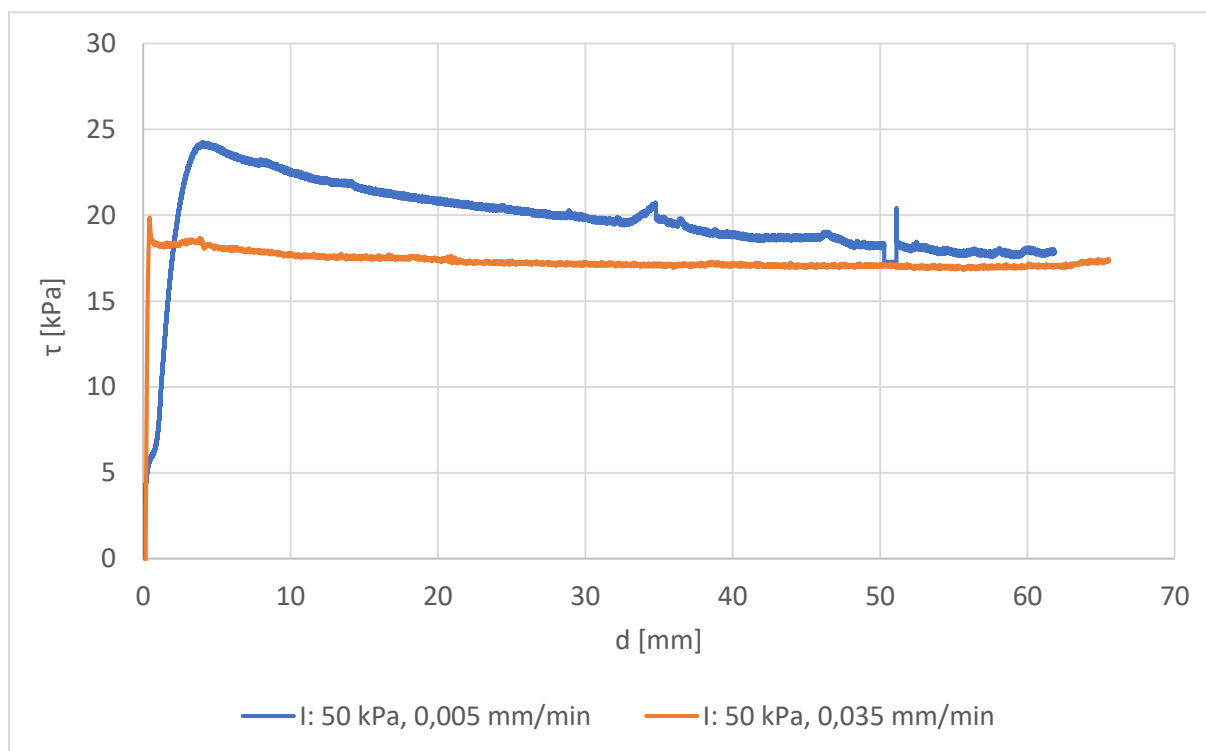
Faktorová et al. (2019) naměřili na materiálu z lokality Černá Pole, za komorových tlaků 200, 400 a 800 kPa, průměrnou hodnotu $\varphi^*_{cs}=25.5^\circ$. S ohledem na hodnotu od Faktorová et al. a vyšší hodnoty naměřené Fenclem, považuji mnou naměřené hodnoty za reálné.

Ze získaných výsledků je vidět důležitý fakt, že kritická pevnost nezávisí na struktuře zeminy, jinak by zjištění kritické pevnosti na rekonstituovaných vzorcích nebylo možné. Používat rekonstituované vzorky pro naměření kritické pevnosti je tedy korektní. Zda by se dal získat korektní výsledek vrcholové pevnosti na rekonstituovaných vzorcích stojí za další výzkum.

5.2.2 Rotační krabicové smykové zkoušky

Rotační krabicové smykové zkoušky proběhly na dvou vzorcích. První fáze zkoušky I proběhla za efektivního normálového napětí σ' rovno 50 kPa a rychlosti smýkání 0,005 mm/min. Druhá fáze proběhla na stejném vzorku za stejného napětí, ale rychlostí 0,035 mm/min. První fáze zkoušky II proběhla na druhém vzorku znovu při napětí 50 kPa a rychlosti smýkání 0,035 mm/min. Druhá fáze proběhla na stejném vzorku při napětí 100 kPa a stejné rychlosti smýkání. První vzorek se tedy zkoušel za stejného napětí dvěma různými rychlostmi a druhý zase za dvou různých napětí stejnou rychlostí.

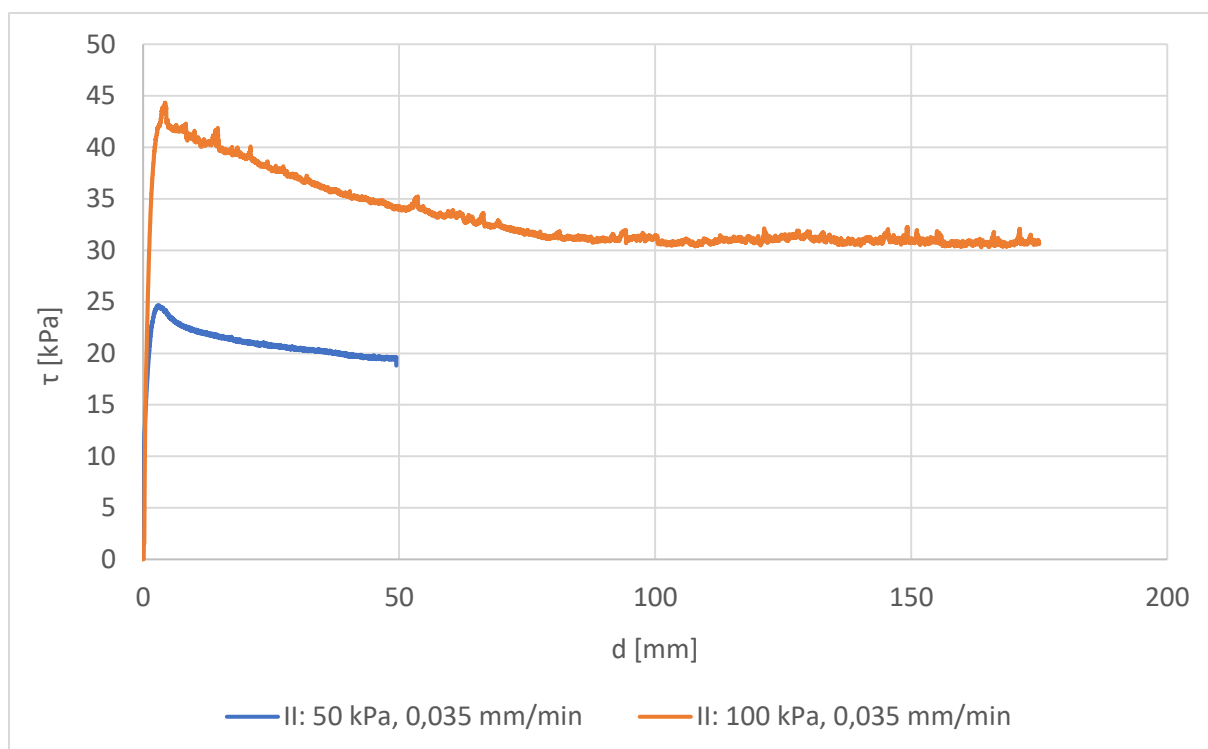
Na Obr. 45 můžeme vidět záznam ze zkoušky I v závislosti smykového napětí τ na posunu d (dráha otáčivého pohybu).



Obr. 45 Vyhodnocení rotačních zkoušek - Zkouška I – závislost smykového napětí τ na dráze d

Vidíme zde nárůst smykového napětí na počátku smýkání s vrcholem přibližně ve 4 mm a poté klesání s malými výkyvy až na konstantní hodnotu. Oranžová linie takový nárůst odporu nemá, což je pravděpodobně způsobeno předsmýknutím vzorku v první fázi zkoušky (první fáze – modrá linie, druhá fáze – oranžová linie).

Na Obr. 46 je znázorněn záznam zkoušky II. V obou fázích vidíme nejprve nárůst smykového napětí s vrcholem znovu v přibližně 4 mm. V první fázi (modrá linie) se zdá, že smýkání mohlo pokračovat ještě delší dobu, protože smykové napětí by pravděpodobně ještě mírně kleslo. To potvrzuje modrá linie ze zkoušky I, kde minimum nastalo až po 50 mm, kde modrá linie ze zkoušky II končí. V případě oranžové linie (100 kPa) vidíme, že k ustálení hodnoty smykového napětí byla třeba mnohem delší doba, konstantní hodnota nastává až po přibližně 100 mm dráhy.



Obr. 46 Vyhodnocení rotačních zkoušek - Zkouška II – závislost smykového napětí τ na dráze d

Zkoušky jsem se snažil provádět „flush” metodou (viz kap. 4.3.4) a když zatlačení do vzorku, které je měřeno orientačně, přesáhlo mez 0,75 mm, tak jsem doplnil materiál do prstence, aby vzorek měl maximální možnou výšku před smýkáním. Tření mezi zeminou a horní a dolní deskou stroje jsem se tak snažil minimalizovat (viz Obr. 34).

Vnitřní residuální úhel tření φ_{res}^* jsem vypočetl ze vztahu (5.3) a výsledky jsou uspořádány v Tab. 9.

| ČÍSLO ZKOUŠKY | I: 50-0,005 | I: 50-0,035 | II: 50-0,035 | II: 100-0,035 |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|
| σ [kPa] | 50 | 50 | 50 | 100 |
| τ [kPa] | 17.6 | 16.8 | 18.8 | 29.8 |
| φ_{res}^* [°] | 19.4 | 18.6 | 20.6 | 16.6 |

Tab. 9 Výsledky residuální pevnosti φ_{res}^*

Vidíme, že hodnota pevnosti ze zkoušky II: 50-0,035 skutečně mírně vyčnívá a může být oproti ostatním mírně nadhodnocená, jelikož smýkání bylo ukončeno příliš brzy. Průměrný vnitřní residuální úhel tření φ_{res}^* je 18,8°. Výslednou hodnotu φ_{res}^* bych zaokrouhlil na 18° s ohledem na nadhodnocení průměrné hodnoty výsledkem zkoušky II: 50-0,035.

Výsledky mohou porovnat s Fenclem (2012), který provedl čtyři rotační smykové zkoušky na rekonstituovaném téglu. Zemina byla odebrána v rámci geotechnického průzkumu pro VMO Dobrovského. Výsledky jsou uspořádány v Tab. 10.

| | | | | |
|-----------------------|------|-----|------|-----|
| σ' [kPa] | 28 | 50 | 100 | 200 |
| φ_{res}^* [°] | 13.0 | 9.5 | 11.6 | 8.9 |

Tab. 10 Hodnoty residuální pevnosti rekonstituovaného brněnského téglu (Fencel, 2012)

Vidíme, že žádná z hodnot nesouhlasí s mými výsledky. Svoboda (2010) ve své práci uvádí hodnoty $\varphi_{res}^* = 12.0^\circ$ a 14.5° . Ani tyto výsledky nejsou ve shodě s mými. Je otázkou, co způsobuje tak velké rozdíly v naměřených pevnostech, ale své výsledky můžu podložit několika fakty.

Na Obr. 47 vidíme snímek vrtného jádra z hloubky 8 až 10 m, na kterém je patrná písková kapsa. Občasnou přítomnost písku (černé barvy) v materiálu jsem detekoval i při přípravě právě vzorků do rotační zkoušky. Tento fakt se může podílet na rozdílech mezi mnou, Fenclem (2012) a Svobodou (2010), kteří oba používali jíl z větší hloubky (15 m až 19,7 m)



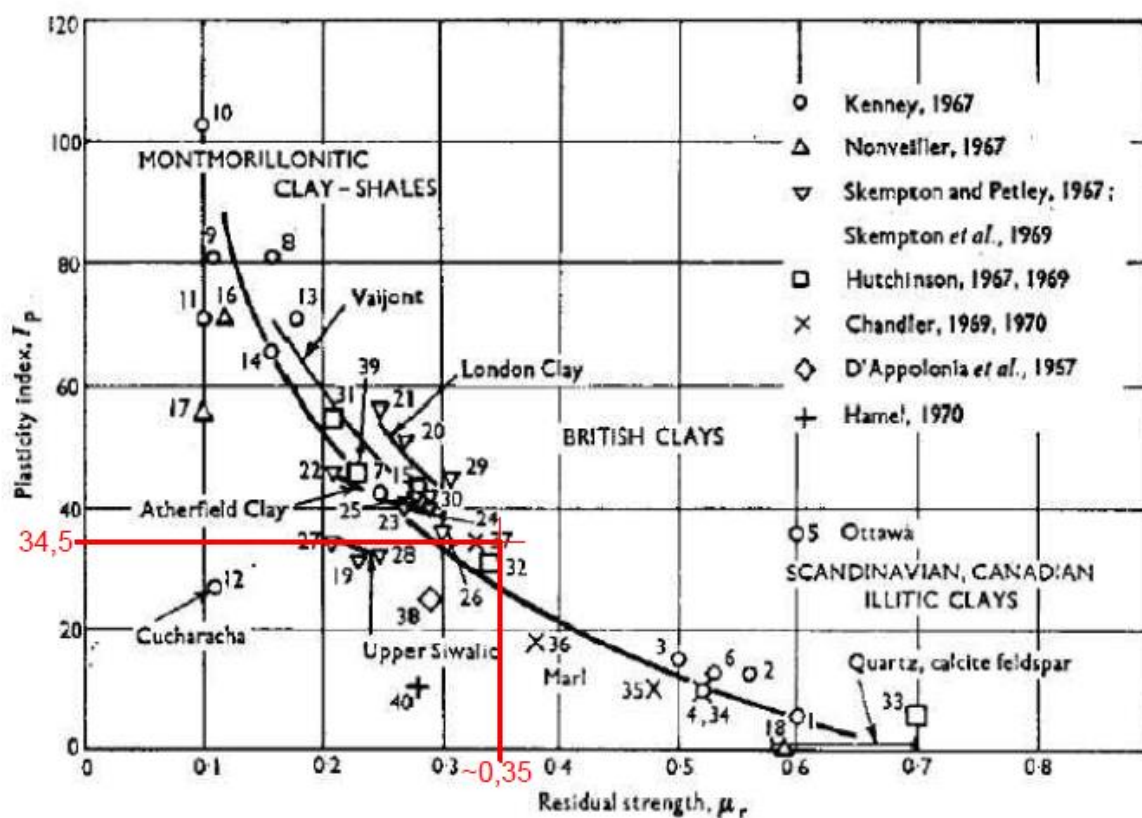
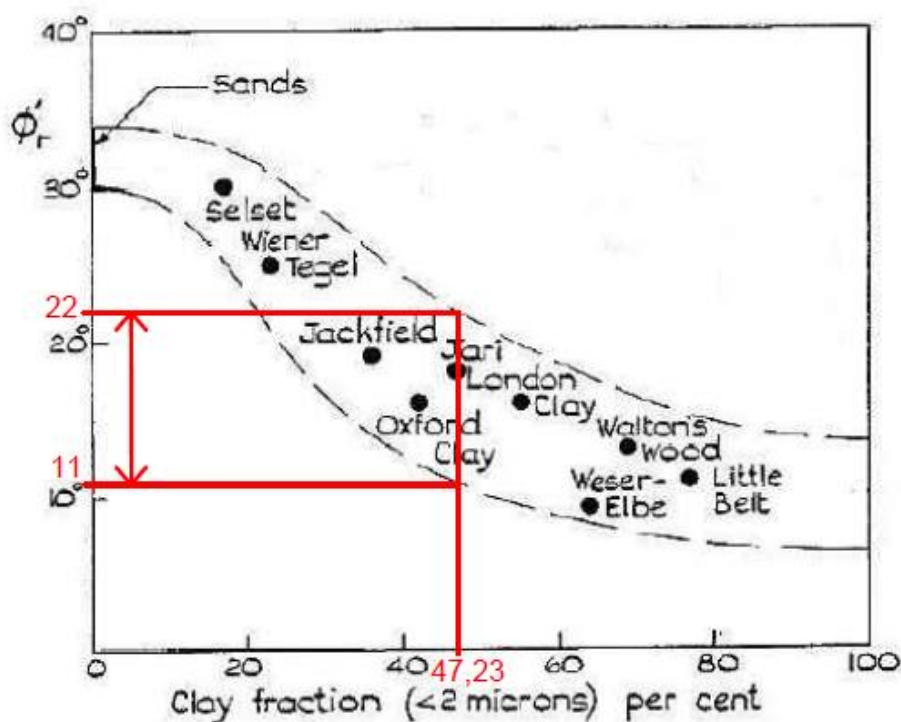
Obr. 47 Vrtné jádro z hloubky 8 až 10 m (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019)

Najser a Boháč (2005) říká, že vrcholová pevnost dosažená v rotačním smykovém přístroji ve skutečnosti představuje pevnost kritickou. Pokud bych takto kritický úhel vnitřního tření vypočetl, získám hodnoty 25.9° , 26.3° a 23.9° (ze zkoušek I:50-0,005, II:50-0,035 a II:100-0,035), což je v dobré shodě s výsledky z triaxiálního přístroje, a tedy to zvyšuje důvěryhodnost měření rotačního stroje.

Dále Maghsoudloo (2013) uvádí několik empirických závislostí. Na Obr. 48 nahoře vidíme závislost residuálního úhlu vnitřního tření na podílu jílových částic v zemině (<0.002 mm). V mém případě tento podíl činí 47.23 %, což dle vyznačeného pásma odpovídá přibližně residuálnímu úhlu 11 až 22° .

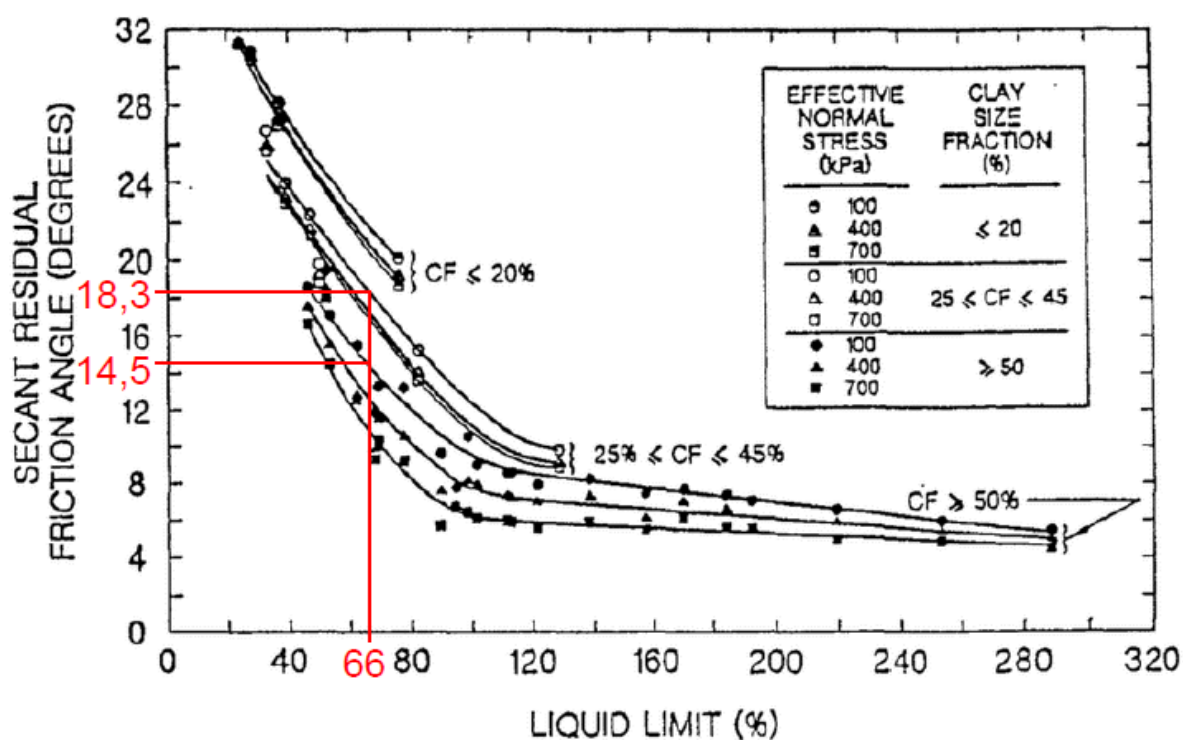
Na Obr. 48 dole vidíme další korelaci residuální pevnosti, tentokrát v závislosti na indexu plasticity. Index plasticity je 34.5 % (viz Tab. 2) a v kombinaci se mnou naměřeným smykovým napětím by v tomto zobrazení bod odpovídající těmto hodnotám ležel v reálné oblasti.

Na Obr. 49 vidíme závislost mezi residuálním úhlem vnitřního tření a vlhkostí na mezi tekutosti (66 % viz Tab. 2). Dle tohoto zobrazení by se residuální úhel vnitřního tření pro normálové napětí rovno



Obr. 48 Závislost mezi podílem jílových částic a residuálním úhlem vnitřního tření (nahore) (Maghsoudloo, 2013) a závislost mezi residuální pevností a indexem plasticity I_p (dole) (Voight, 1973)

100 kPa pohyboval v rozmezí 14,5 až 18,3° v závislosti na podílu jílových částic. V mém případě spíše blíže k vyšší hodnotě. Tyto indicie tedy naznačují reálnost mých výsledků.



Obr. 49 Závislost mezi residuálním úhlem vnitřního tření a vlhkostí na mezi tekutosti (Stark & Eid, 1994)

Dewoolkar a Huzjak (2005) dělali zkoušky jílovce z Colorada ($w_L=66\%$, $I_p=40\%$). Pro normálové napětí 69,9 kPa naměřili $17,5^\circ$ a pro 70,4 kPa naměřili $17,7^\circ$ (Obr. 50).

| LL (%) | PI(%) | Effective Normal Stress (kPa) | Residual Shear Stress (kPa) | Residual friction angle ($^\circ$) |
|--------|-------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 66 | 40 | 69.9 | 22 | 17.5 |
| 66 | 40 | 283.9 | 63.2 | 12.5 |
| 66 | 40 | 552.1 | 102.5 | 10.5 |
| 65 | 41 | 70.4 | 22.5 | 17.7 |
| 65 | 41 | 286.3 | 59.9 | 11.8 |
| 65 | 41 | 557.3 | 104.9 | 10.7 |

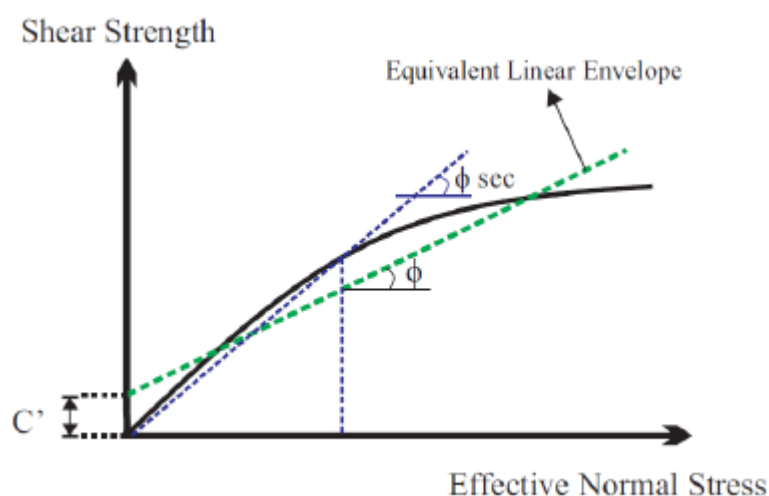
Obr. 50 Residuální pevnost jílovce z Colorada (Dewoolkar & Huzjak, 2005) (Maghsoudloo, 2013)

Bishop et al. (1971) dělali zkoušky neporušených vzorků brown London Clay (60 % částic <0.002 mm, $w_L=82\%$, $I_p=33\%$) ve smykové krabici. Pro normálové napětí 27.6 kPa až 91 kPa naměřili úhel 21.8 až 16.1° (Obr. 51). Tyto hodnoty také potvrzují reálnost mých výsledků.

| Effective normal stress (kPa) | shear stress (kPa) | Secant residual friction angle (°) | residual strength |
|-------------------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------|
| 27.6 | 10.3 | 20.6 | |
| 34.5 | 13.8 | 21.8 | |
| 55.2 | 17.9 | 18 | |
| 82.7 | 29 | 19.3 | |
| 91 | 26.2 | 16.1 | |
| 122 | 27.6 | 12.7 | |
| 122 | 30.3 | 14 | |
| 184.1 | 45.5 | 13.9 | $c = 0.5 \text{ kPa}$ |
| 184.1 | 48.3 | 14.7 | $\varphi = 14.6^\circ$ |
| 184.1 | 55.2 | 16.7 | |
| 215.1 | 55.2 | 14.4 | |
| 215.1 | 62.1 | 16.1 | |
| 277.2 | 58.6 | 11.9 | |
| 277.2 | 62.1 | 12.6 | |
| 308.2 | 68.9 | 12.6 | |
| 308.2 | 82.7 | 15 | |

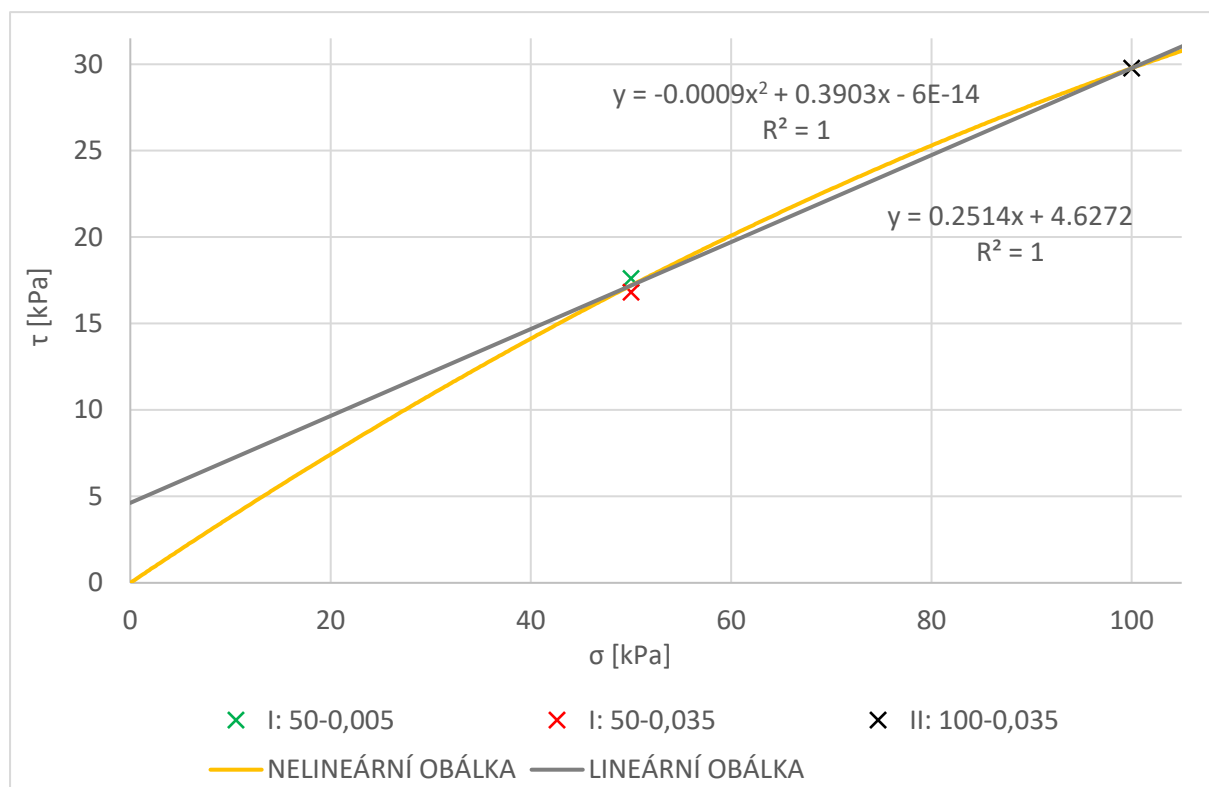
Obr. 51 Residuální pevnost brown London clay (Bishop, 1971) (Maghsoudloo, 2013)

Maghsoudloo (2013) dále uvádí, že obálka residuální pevnosti není lineární a se zvyšujícím se normálovým napětím hodnota pevnosti klesá (Obr. 52). To lze pozorovat i z hodnot na Obr. 50 a Obr. 51. Tuto teorii podporují i mé výsledky. Pokusil jsem se sestavit podobu lineární i nelineární obálky residuální pevnosti dle Obr. 52. Využil jsem data ze zkoušky I a II (hodnotu z II: 50-0,035 jsem zanedbal). Výsledek můžete vidět na Obr. 53. Jelikož výslednou křivku a přímku jsem sestavil jen ze tří



Obr. 52 Nelineárnost residuální obálky pevnosti (Maghsoudloo, 2013)

bodů je nutné je brát s rezervou, nicméně rozdíl mezi lineární a nelineární obálkou residuální pevnosti je patrný.



Obr. 53 Nelineární a lineární obálka residuální pevnosti brněnského jílu

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo stanovit stlačitelnostní a pevnostní charakteristiky brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích. V plánu bylo použití edometrického, triaxiálního a rotačního smykového přístroje. Všechny plánované zkoušky proběhly dle mého názoru úspěšně a byla z nich vyhodnocena reálná data.

V části zabývající se stlačitelností jsem vyhodnotil vnitřní konstanty stlačitelnosti jílu z ulice Křenová. Vnitřní číslo stlačitelnosti C_c^* je 0,44, vnitřní číslo pórovitosti e_{100}^* je 1,38 a vnitřní číslo stlačitelnosti pro větev odtížení C_{cr}^* je 0,07. Navíc jsem vypočetl tyto veličiny i pro jíl z lokalit Královo pole a Leitnerova. Mezi výsledky z Křenové a Královým polem panovala shoda, Leitnerova se odlišovala vlivem granulometrického složení. Dále jsem v této části potvrdil, že stlačitelnost rekonstituovaných jílu se skutečně chová dle křivky ICL od Burlanda (1990), jelikož křivky prvotního přetížení ze všech tří lokalit průběh ICL kopírovaly.

V části zabývající se kritickou pevností jsem získal reálné hodnoty této pevnosti. Výslednou hodnotu φ_{cs}^* jsem stanovil na 24,6°. Mé výsledky souhlasily s výsledky od Faktorová et al. (2019) a byly mírně vyšší než hodnoty od Fencla (2012). V počátku této práce popisují vliv struktury na stlačitelnost zeminy, ale na kritickou (a ani residuální) pevnost by struktura vliv mít neměla.

V neposlední řadě jsem za pomoci rotační smykové krabice stanovil i residuální pevnost. Tyto výsledky nesouhlasily jak s výsledky od Fencle (2012), který prováděl zkoušky na jílu odebraném v rámci průzkumu pro VMO Dobrovského, tak s výsledky od Svoboda (2010). Podle několika empirických zásad jsou však takové hodnoty reálné a v zahraničí byly podobné hodnoty naměřeny (brown London clay (Bishop, 1971), jílovec z Colorada (Dewoolkar & Huzjak, 2005)). Reálnost získaných výsledků navíc podporuje fakt, že kritická pevnost získaná z rotační smykové zkoušky je ve shodě s kritickou pevností ze zkoušek triaxiálních. Výslednou hodnotu φ_{res}^* jsem stanovil na 18°.

Do budoucna by bylo zajímavé pokusit se na rekonstituovaných vzorcích vyhodnotit vrcholovou pevnost brněnského jílu. Toho by se dosáhlo simulací reálné překonsolidace brněnského jílu, pro který se odhaduje OCR (stupeň překonsolidace) na 6,5 a POP („pre-overburden pressure“) na 900 až 1000 kPa. Výsledky by se poté porovnály s chováním neporušených vzorků v triaxiální kompresi.

7 CITOVANÁ LITERATURA

- Bishop, A. W. (1971).** The influence of progressive failure on the choice of the method of stability analysis. *Geotechnique*, 2, stránky 168-172.
- Burland, J. B. (1990).** On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique* 40, No. 3, stránky 329-378.
- ČGS. (31. květen 2020).** *Geologická mapa 1 : 50 000 - indexy*, *Geologická mapa 1 : 50 000*. Načteno z Geovědní mapy 1 : 50: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>
- Chandler, R. J., de Freitas, M., & Marinos, P. (2004).** Geotechnical characterisation of soils and rocks: A geological perspective. *Advances in Geotechnical Engineering*, pp. 67–102. London.
- Dewoolkar, M., & Huzjak, R. (2005).** Drained residual shear strenght of some claystones from Front Range Colorado. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), stránky 1543-1551.
- Faktorová, K., Chalmovský, J., Koudela, P., & Míča, L. (16-17. May 2019).** Initial investigation of the intrinsic geomechanical properties of soils in area of landslide Černá Pole. 7 stran. Vilnius, Lithuania.
- FAST VUT Ústav geotechniky. (květen 2019).** Bytový dům, ul. Křenová, Brno. Laboratorní zkoušky mechaniky zemin. Etapa č. 1. Brno.
- Fencel. (2012).** Pevnost brněnského téglu v kritickém stavu - Diplomová práce. 64 stran. Praha. Vedoucí: Ing. Jan Boháč, CSc.
- Fyzikálně indexové vlastnosti zemin, BF002, podklady do cvičení.* (2020). Načteno z Fakulta stavební, ústav geotechniky: <https://geotech.fce.vutbr.cz/podklady-do-cviceni/>
- Hruby, A. (2018).** *Bytový dům, ulice Křenová, Brno*. Boskovice.
- Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení.* (2020). Načteno z Fakulta stavební, Ústav geotechniky: <https://geotech.fce.vutbr.cz/podklady-do-cviceni/>
- Maghsoudloo, A. (Leden 2013).** Nonlinearity of the residual shear strenght envelope in stiff clays - Diplomová práce. 103 stran. Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nejan Huvaj Sarihan.
- Meehan, C., Brandon, T., & Duncan, J. (2007).** Measuring Drained Residual Strengths in the Bromhead Ring Shear. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 30(6), stránky 466-473.
- Mitchell. (1976).** *Fundamentals of soil behaviour*. New York: Wiley.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005).** *Fundamentals of Soil Behaviour*, Third Edition. 558 stran. New Jersey: Wiley.
- Najser, J., & Boháč, J. (2005).** Pevnost zemin v kritickém stavu v torzním krabicovém přístroji. K. Weiglová a kol. *Sborník příspěvků 33. konference Zakládání staveb Brno*, 37-42.
- Pavlová, M. (2011).** *Mocnost nadloží a překonsolidace brněnského jílu* - *Bakalářská práce*. Praha.
- Pietruszczak, S. (2010).** *Fundamentals of Plasticity in Geomechanics*. CRC Press.

- Smyková pevnost zemin, BF002, podklady do cvičení.* (31. leden 2019). Načteno z Fakulta stavební, Ústav geotechniky: <https://geotech.fce.vutbr.cz/podklady-do-cviceni/>
- Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress).** (1990). *British standard.* UK: BSI.
- Stark, T., & Eid, H. (1994).** Drained residual strenght of cohesive soils. *J. Geotechnical Eng.*, 120(5), stránky 856-871.
- Stark, T., & Vettel, J. (March 1992).** Bromhead Ring Shear Test Procedure. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No.1*, stránky 24-32.
- Svoboda, T. (2010).** *Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu - Doktorská disertační práce.* 177 stran. Praha.
- Voight, B. (1973).** Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strenght of natural soils. *Geotechnique* 23,2, stránky 265-267.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Vliv metastabilního uspořádání částic na číslo pórovitosti zeminy pod daným efektivním konsolidačním napětím (Mitchell & Soga, 2005) | 3 |
| Obr. 2 Možné stavy zeminy v zobrazení závislosti čísla pórovitosti na efektivním napětí (Mitchell & Soga, 2005)..... | 4 |
| Obr. 3 Jednosé křivky stlačitelnosti pro různé rekonstituované jíly (Burland, 1990) | 5 |
| Obr. 4 Křivka stlačitelnosti pro daný jíl (Burland, 1990)..... | 6 |
| Obr. 5 Využití indexu pórovitosti I_v k normalizaci vnitřní linie stlačitelnosti (Burland, 1990)..... | 6 |
| Obr. 6 ICL vzniklá normalizací křivek vnitřní stlačitelnosti z Obr. 3 (Burland, 1990) | 7 |
| Obr. 7 Porovnání křivek stlačitelnosti normálně konsolidovaných jílu a rekonstituovaného jílu: regresní křivka skrz data NC jílu je SCL (Burland, 1990)..... | 8 |
| Obr. 8 Odlišné způsoby jak dosáhnout stejného stavu v bodu b (Mitchell & Soga, 2005)..... | 8 |
| Obr. 9 Přehled přírodních typů jílu v zobrazení index pórovitosti-efektivní napětí (Chandler, de Freitas, & Marinos, 2004) | 9 |
| Obr. 10 Ideální chování jednoose konsolidovaného rekonstituovaného jílu v triaxiální kompresi: a) e vs. σ'_a a $(\sigma'_a + \sigma'_r)$, b) K_o podmínky, c) odvodněná zkouška, d) neodvodněná zkouška (Burland, 1990)..... | 10 |
| Obr. 11 Geologická mapa (Pavlová, 2011) | 12 |
| Obr. 12 Geologická mapa oblasti zájmu: fialová-navážka, žlutá-spraš, modrá-nivní sediment (ČGS, 2020)..... | 13 |
| Obr. 13 Poloha vrtu J-3/2019 ve stavební jámě (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019) | 13 |
| Obr. 14 1D konsolidace rekonstituovaného jílu pro triaxiální zkoušky | 15 |
| Obr. 15 1D konsolidace rekonstituovaného jílu pro edometrické zkoušky..... | 16 |
| Obr. 16 Schéma edometrické krabice (1-edometrická krabice, 2-edometrický prstenec, 3-porézni destičky, 4- vzorek zeminy, 5-voda, 6-svislé zatížení) (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)..... | 17 |
| Obr. 17 Vzorek v prstenci před zkouškou, $d=50$ mm, $v=20$ mm | 17 |
| Obr. 18 Průběhy napětí σ'_a , σ_a a u v závislosti na čase t (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020) | 18 |
| Obr. 19 Závislost stlačení vzorku s_a na čase t (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)..... | 18 |
| Obr. 20 Trojfázový model zeminy (Fyzikálně indexové vlastnosti zemin, BF002, podklady do cvičení, 2020)..... | 19 |
| Obr. 21 Závislost čísla pórovitosti e na svislém efektivním napětí σ'_a (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)..... | 20 |

| | |
|--|----|
| Obr. 22 Příklad závislosti čísla pórovitosti e na efektivním napětí $\log \sigma'_a$ pro trojí přitížení a dvojnásobné odlehčení (Jednoosá stlačitelnost a konsolidace (edometrická zkouška), BF002, podklady do cvičení, 2020)..... | 21 |
| Obr. 23 Schéma triaxiální komory (upraveno) (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990) | 22 |
| Obr. 24 Hlavní napětí na vzorku v triaxiální komoře..... | 22 |
| Obr. 25 Změna tvaru a průřezové plochy vzorku (Smyková pevnost zemin, BF002, podklady do cvičení, 2019)..... | 23 |
| Obr. 26 Chování zemin při triaxiální kompresi v závislosti na kontraktanci a dilatanci (Mitchell & Soga, 2005)..... | 24 |
| Obr. 27 Vzorek po ukončení zkoušky a rozebrání komory – tvarem připomíná soudek | 25 |
| Obr. 28 Mohr-Coulombova podmínka porušení (Smyková pevnost zemin, BF002, podklady do cvičení, 2019)..... | 26 |
| Obr. 29 Průběhy smykového napětí τ v závislosti na přetvoření ε a normálovém napětí σ . Červená – vrcholová pevnost, modrá – kritická pevnost, zelená – residuální pevnost (Smyková pevnost zemin, BF002, podklady do cvičení, 2019) | 27 |
| Obr. 30 Vzorek v kovové desce před zkouškou | 27 |
| Obr. 31 Typické uspořádání kruhového stroje v příčném řezu (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990) | 28 |
| Obr. 32 Typické uspořádání kruhového stroje v půdorysu (Soils for civil engineering purposes - Part 7: Shear strength tests (total stress), 1990) | 28 |
| Obr. 33 Vznik smykové plochy v rotačním stroji Bromhead (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007) ... | 29 |
| Obr. 34 Vznik tření vlivem zatlačení horní desky do vzorku (Meehan, Brandon, & Duncan, 2007) ... | 29 |
| Obr. 35 Odvodněná pevnost jílu pro překonsolidovanou a normálně konsolidovanou zeminu (Stark & Vettel, 1992)..... | 30 |
| Obr. 36 Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost e vs. $\log \sigma_v$ | 31 |
| Obr. 37 Tabulka vnitřních konstant stlačitelnosti rekonstituovaných jílu (Burland, 1990) | 32 |
| Obr. 38 Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost I_v vs. $\log \sigma_v$ | 33 |
| Obr. 39 Královo pole - Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost I_v vs. $\log \sigma_v$ | 34 |
| Obr. 40 Leitnerova - Vyhodnocení edometrických zkoušek - závislost I_v vs. $\log \sigma_v$ | 35 |
| Obr. 41 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost q vs. ε_1 | 36 |
| Obr. 42 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost u vs. ε_1 | 36 |
| Obr. 43 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost q vs. p' | 37 |
| Obr. 44 Vyhodnocení triaxiálních zkoušek – závislost τ vs. σ' | 38 |
| Obr. 45 Vyhodnocení rotačních zkoušek - Zkouška I – závislost smykového napětí τ na dráze d | 40 |
| Obr. 46 Vyhodnocení rotačních zkoušek - Zkouška II – závislost smykového napětí τ na dráze d | 41 |
| Obr. 47 Vrtné jádro z hloubky 8 až 10 m (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019)..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Obr. 48 Závislost mezi podílem jílových částic a residuálním úhlem vnitřního tření (nahore) (Maghsoudloo, 2013) a závislost mezi residuální pevností a indexem plasticity I_p (dole) (Voight, 1973) | 43 |
| Obr. 49 Závislost mezi residuálním úhlem vnitřního tření a vlhkostí na mezi tekutosti (Stark & Eid, 1994)..... | 44 |
| Obr. 50 Residuální pevnost jílovce z Colorada (Dewoolkar & Huzjak, 2005) (Maghsoudloo, 2013).. | 44 |
| Obr. 51 Residuální pevnost brown London clay (Bishop, 1971) (Maghsoudloo, 2013)..... | 45 |
| Obr. 52 Nelineárnost residuální obálky pevnosti (Maghsoudloo, 2013)..... | 45 |
| Obr. 53 Nelineární a lineární obálka residuální pevnosti brněnského jílu | 46 |

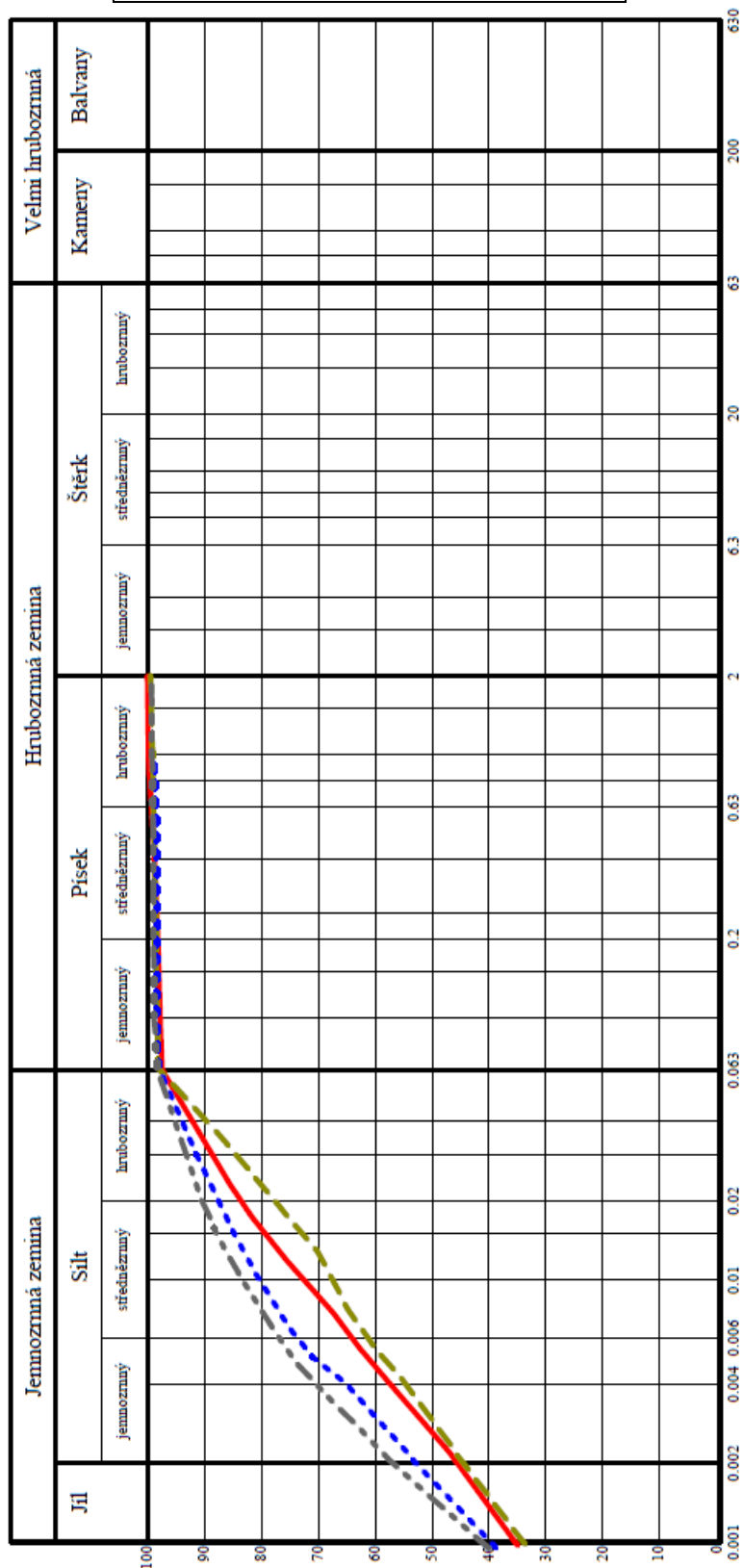
9 SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Popis vrtu (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019) | 14 |
| Tab. 2 Indexové vlastnosti zeminy (FAST VUT Ústav geotechniky, 2019)..... | 14 |
| Tab. 3 Vnitřní konstanty stlačitelnosti C^*_c , e^*_{100} a C^*_{cr} | 32 |
| Tab. 4 Průměrné hodnoty konstant vnitřní stlačitelnosti pro rekonstituovaný jíl z Králova Pole | 34 |
| Tab. 5 Průměrné hodnoty konstant vnitřní stlačitelnosti pro rekonstituovaný jíl z ulice Leitnerova | 35 |
| Tab. 6 Hodnoty sklonu MC linie η_f a vnitřního kritického úhlu tření φ^*_{cs} | 38 |
| Tab. 7 Hodnoty kritické pevnosti rekonstituovaného brněnského téglu (Fencl, 2012)..... | 38 |
| Tab. 8 Hodnoty kritické pevnosti rekonstituovaného brněnského téglu s použitím kluzných destiček (Fencl, 2012) | 39 |
| Tab. 9 Výsledky residuální pevnosti φ^*_{res} | 41 |
| Tab. 10 Hodnoty residuální pevnosti rekonstituovaného brněnského téglu (Fencl, 2012) | 42 |

PŘÍLOHY

1. Přílohy k testovacímu programu

Křivka zrnitosti testovaného jílu - červená



Příprava rekonstituované pasty – strouhání (nahore), míchání (dole)



2. Přílohy ke zkouškám stlačitelnosti

a. Informace o zkouškách

Lokalita: Ulice Křenová, Brno

Zkoušky probíhaly: 2019 - Červen, červenec, srpen

Typ vzorku: Rekonstituovaný

Hloubka odběru: 9,0 m

b. Parametry vzorku a zkoušky

Výška h : 20 mm

Průměr d : 50 mm

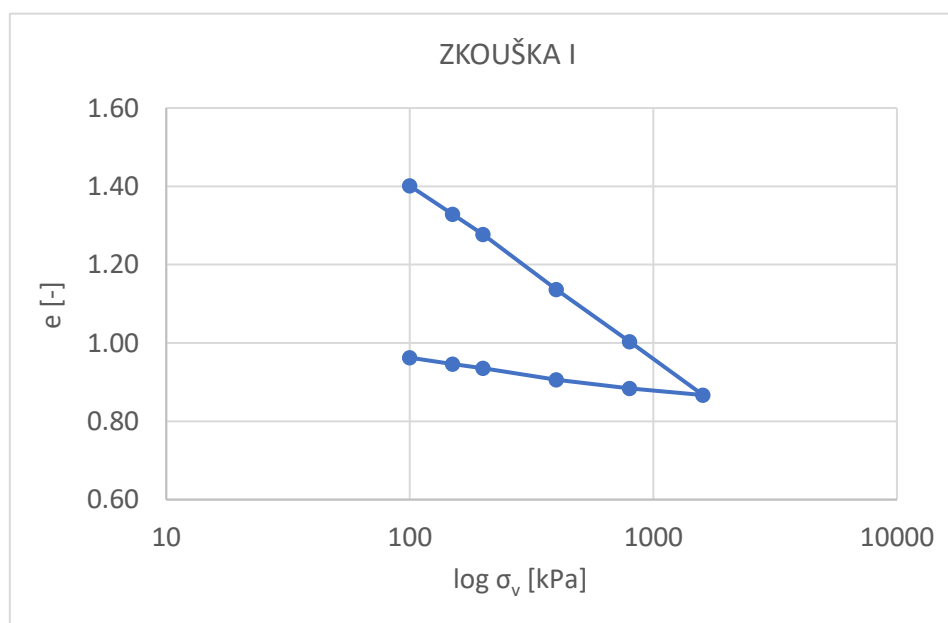
Fáze rekonsolidace: 80-20-80 kPa se sledováním rozdílu přetvoření při napětí 80 kPa

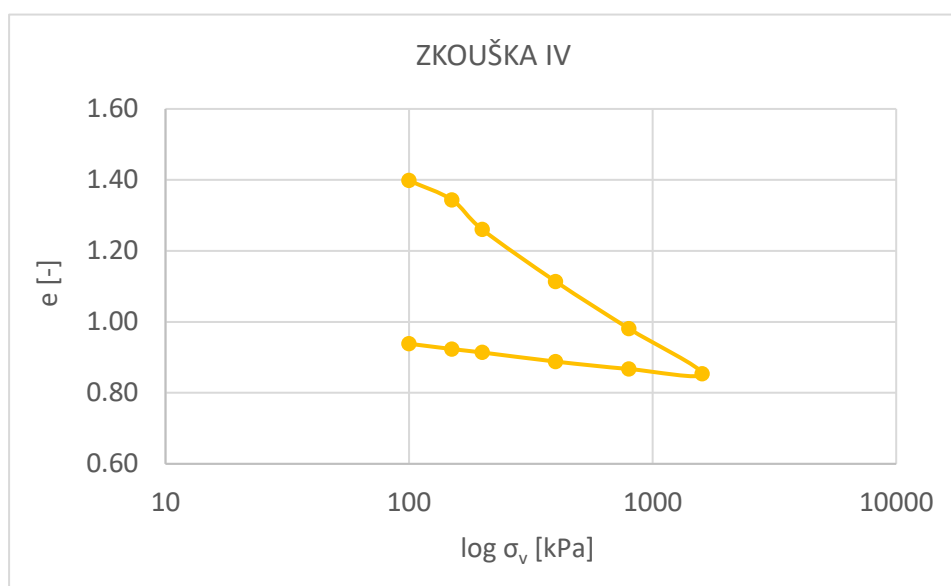
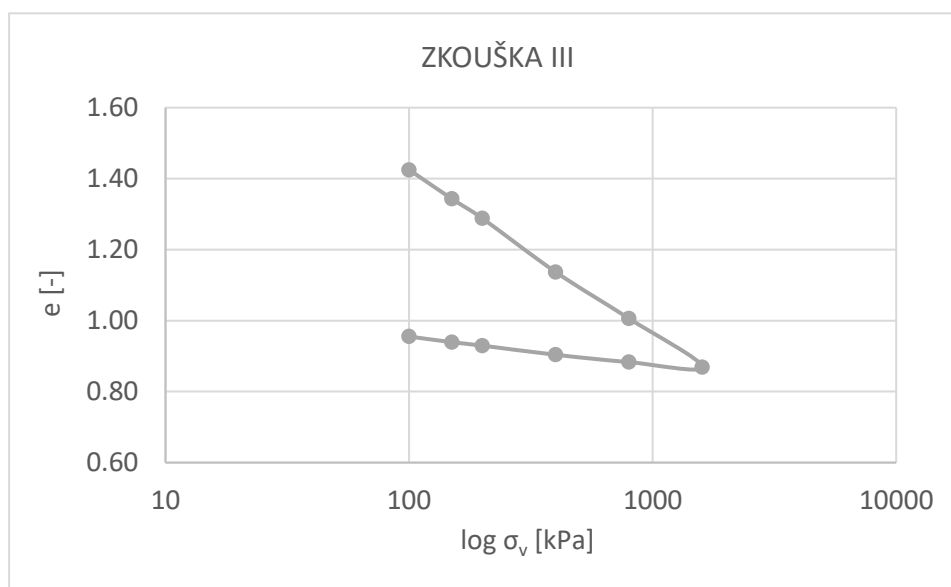
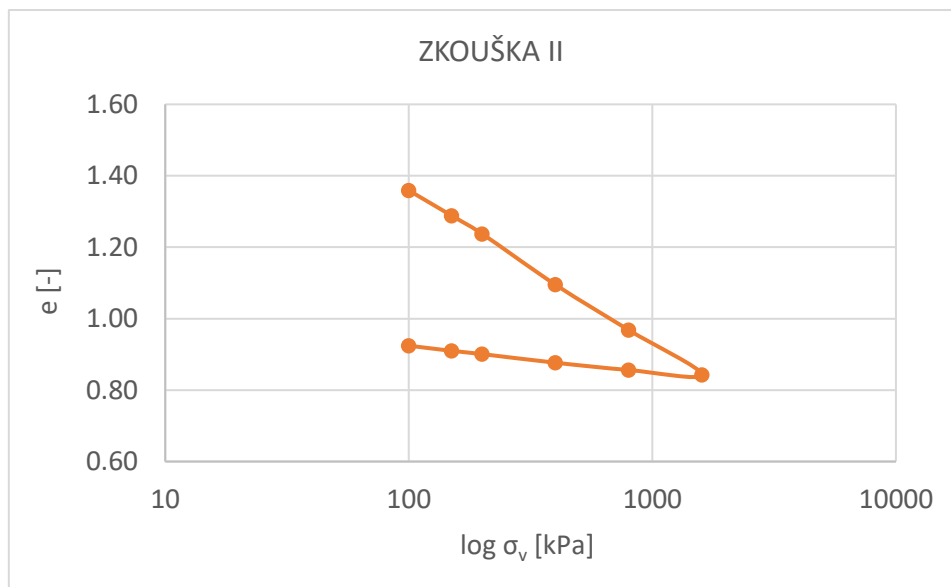
Maximální napětí: 1600 kPa

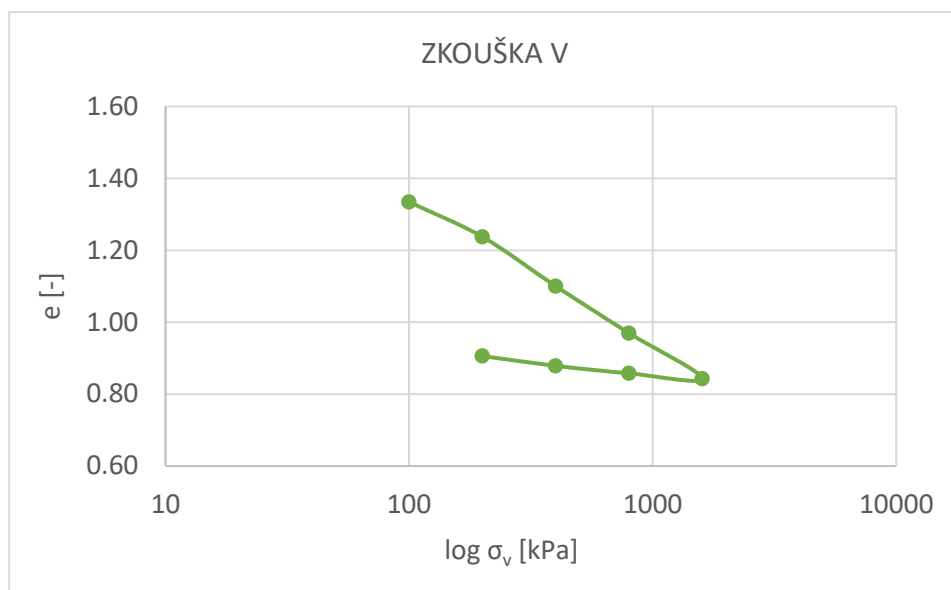
c. Výsledky zkoušky

| ČÍSLO ZKOUŠKY | I | II | III | IV | V | PRŮMĚR |
|---------------|------|------|------|------|------|--------|
| C_c^* | 0.44 | 0.43 | 0.46 | 0.45 | 0.41 | 0.44 |
| e_{100}^* | 1.40 | 1.36 | 1.42 | 1.40 | 1.33 | 1.38 |
| C_{cr}^* | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |

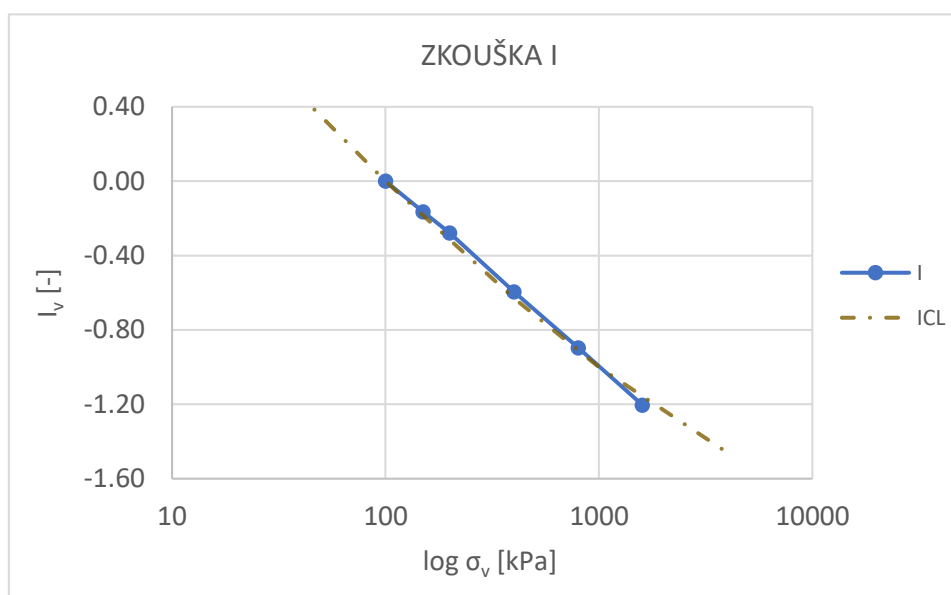
d. Grafické vyhodnocení e vs. $\log \sigma$

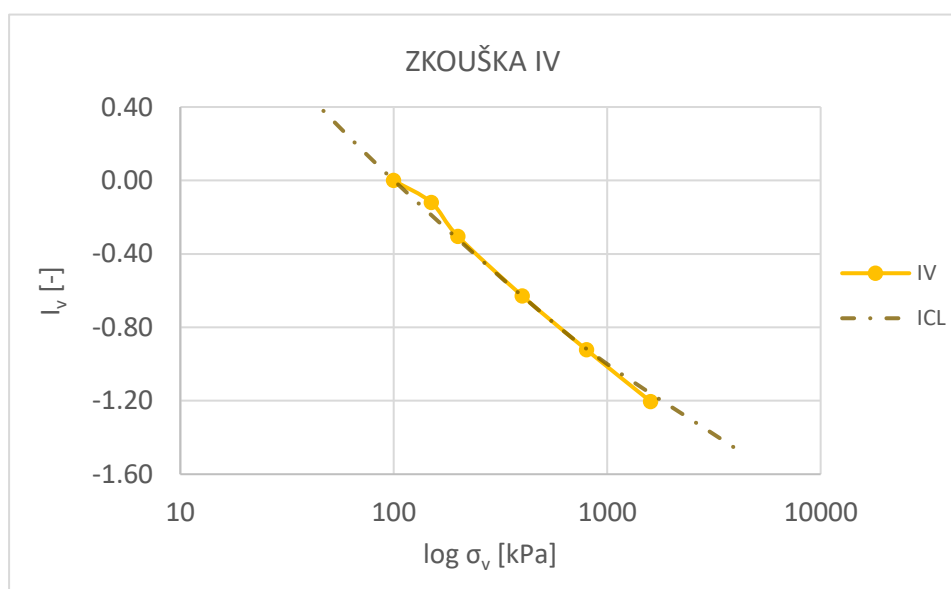
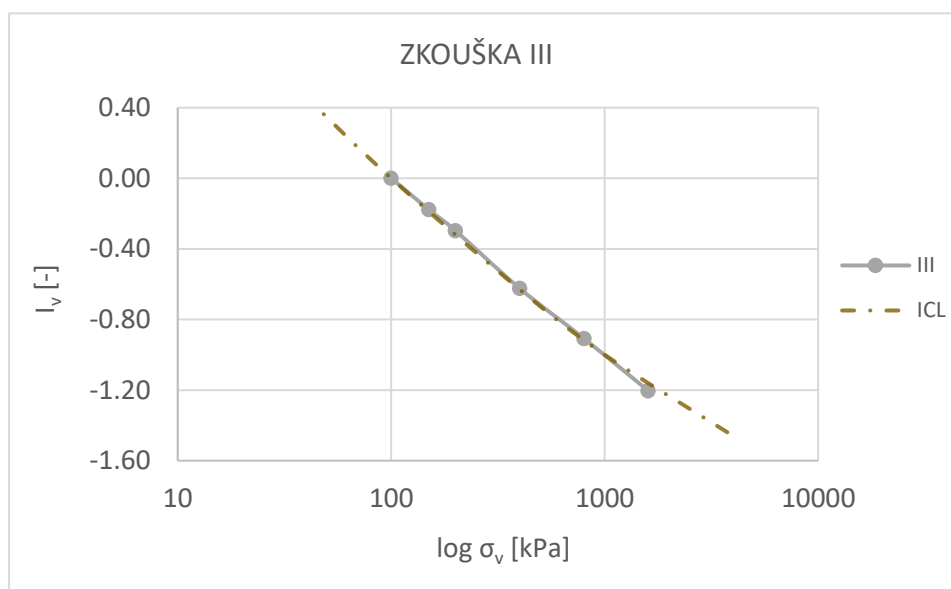
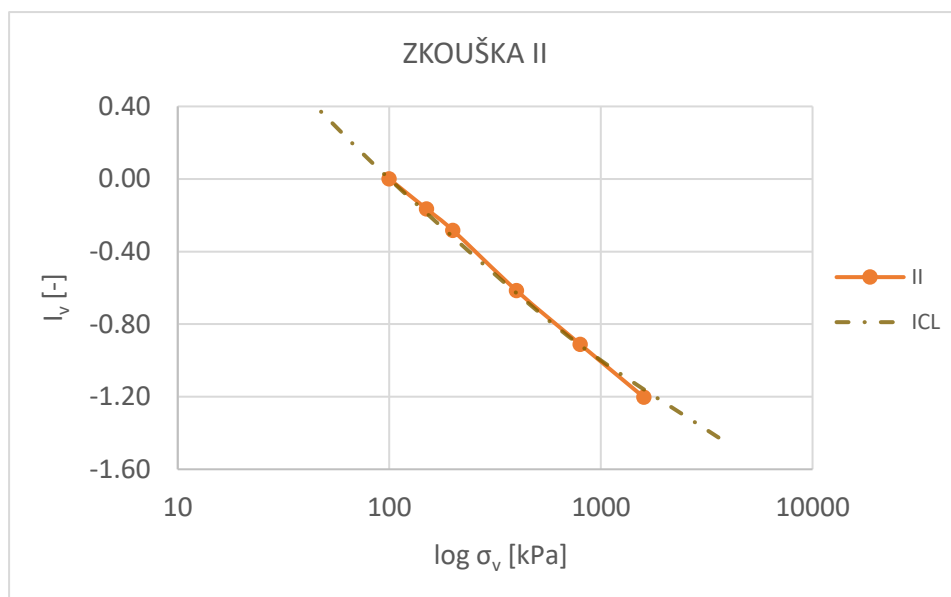


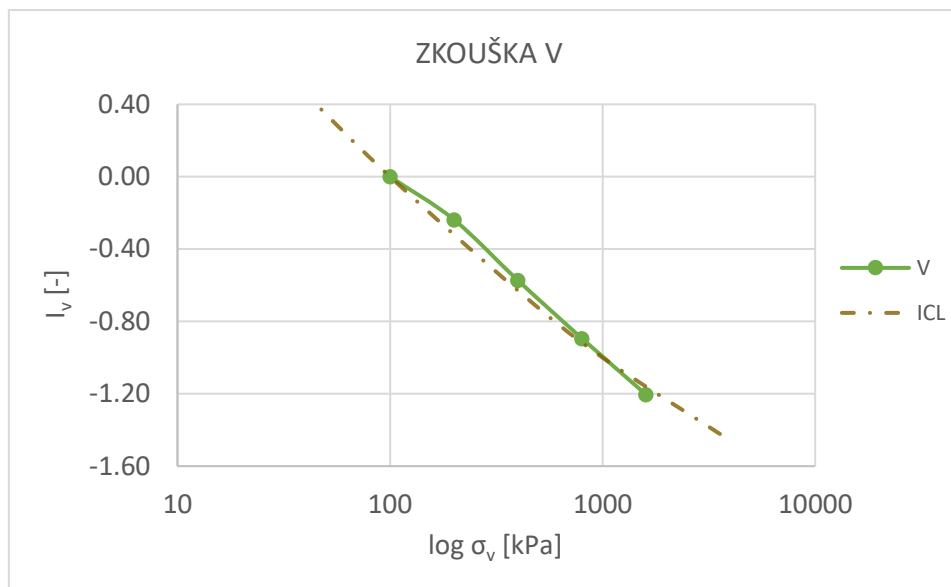




e. Grafické vyhodnocení I_v vs. $\log \sigma$







3. Přílohy ke triaxiálním zkouškám pevnosti

a. Informace o zkouškách

Lokalita: Ulice Křenová, Brno

Zkoušky probíhaly: 2019 – Říjen, 2020 – Leden, duben, květen

Typ vzorku: Rekonstituovaný

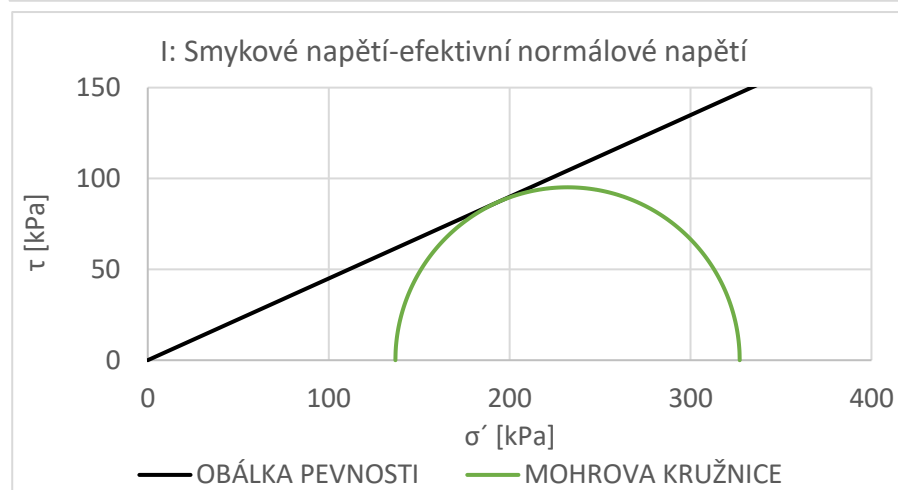
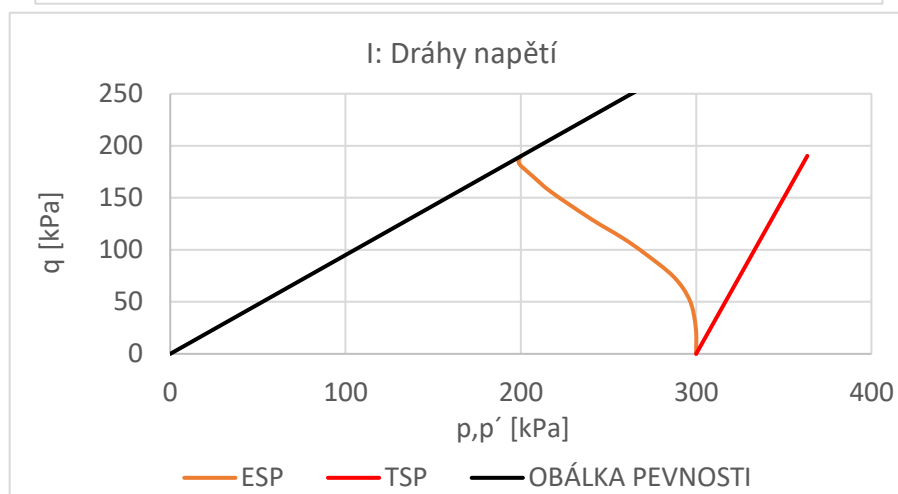
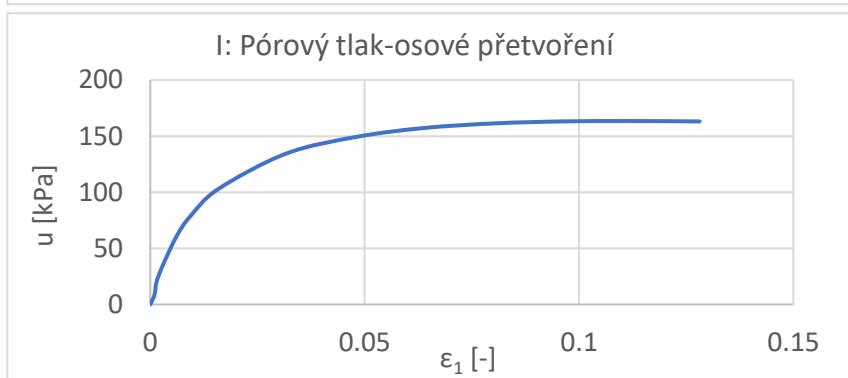
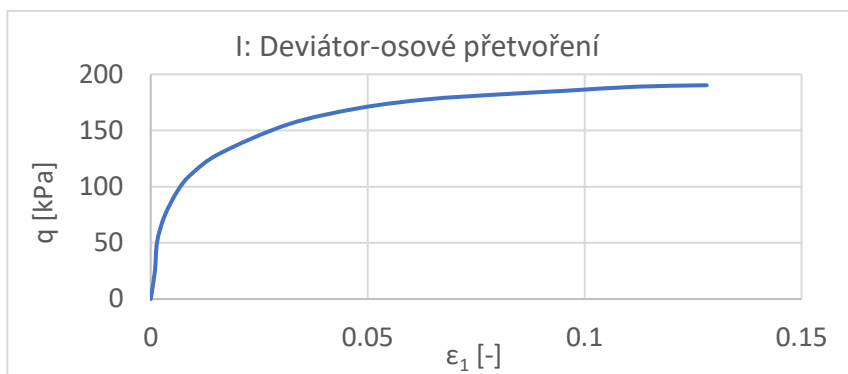
Hloubka odběru: 9,0 m

Typ zkoušky: CIUP (konsolidovaná izotropně, neodvodněná s měřením pórového tlaku)

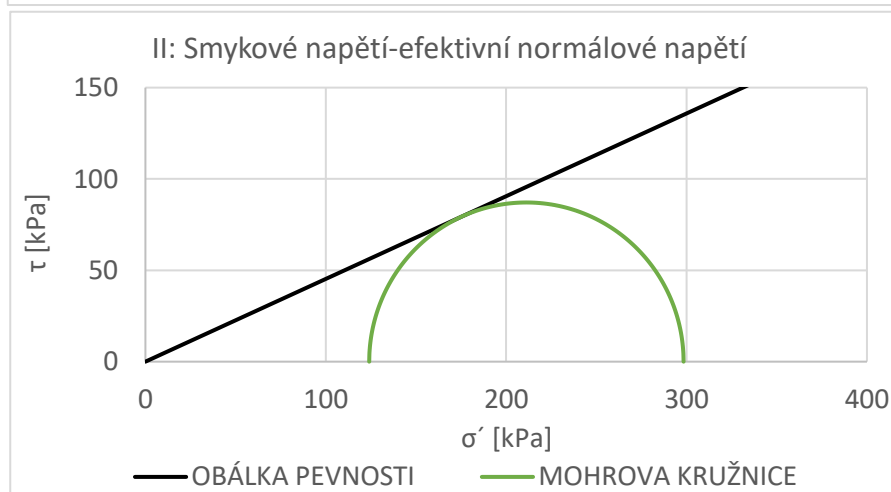
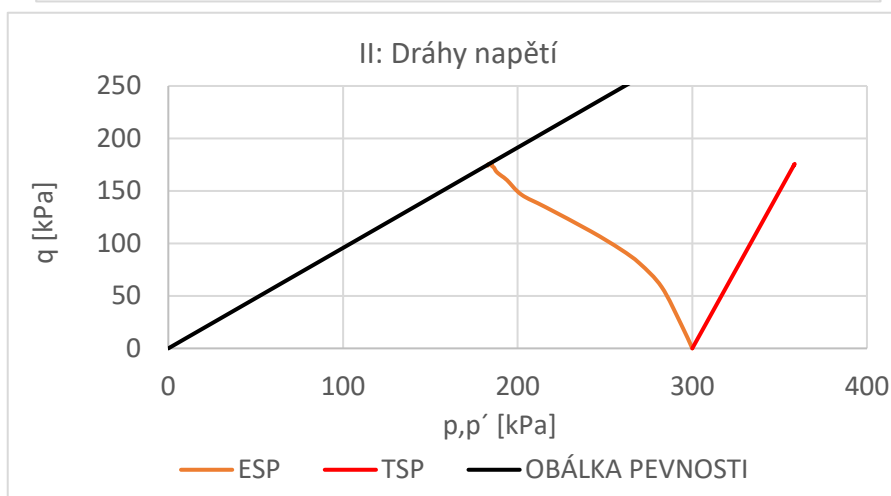
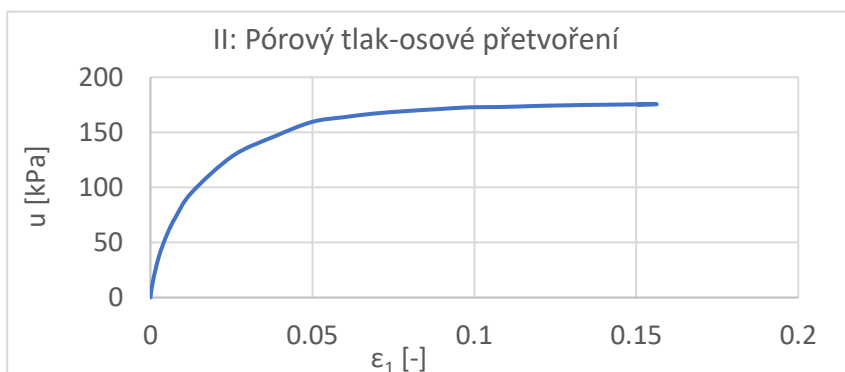
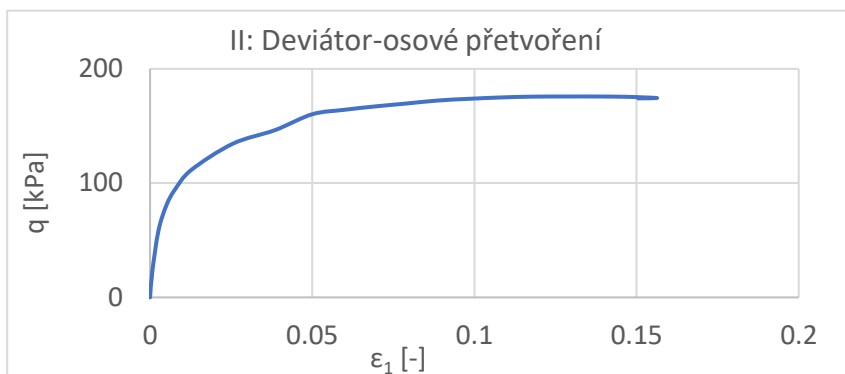
b. Vyhodnocení zkoušek

Viz další strany.

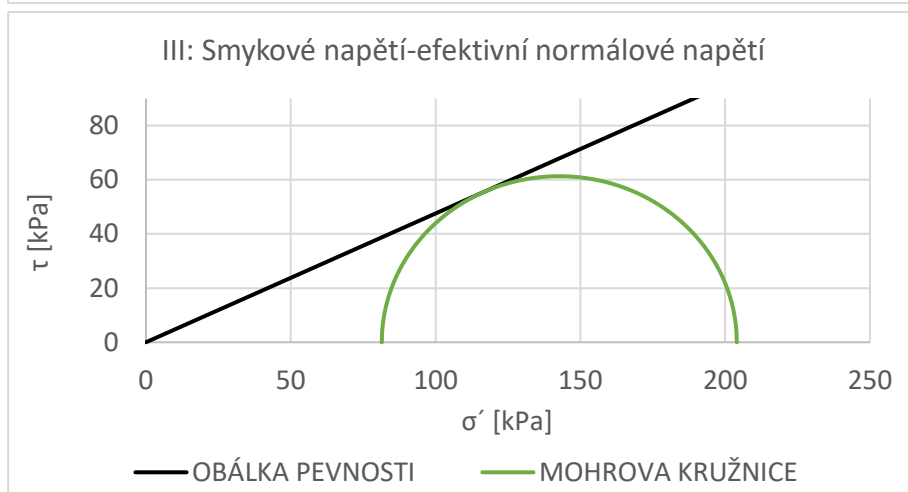
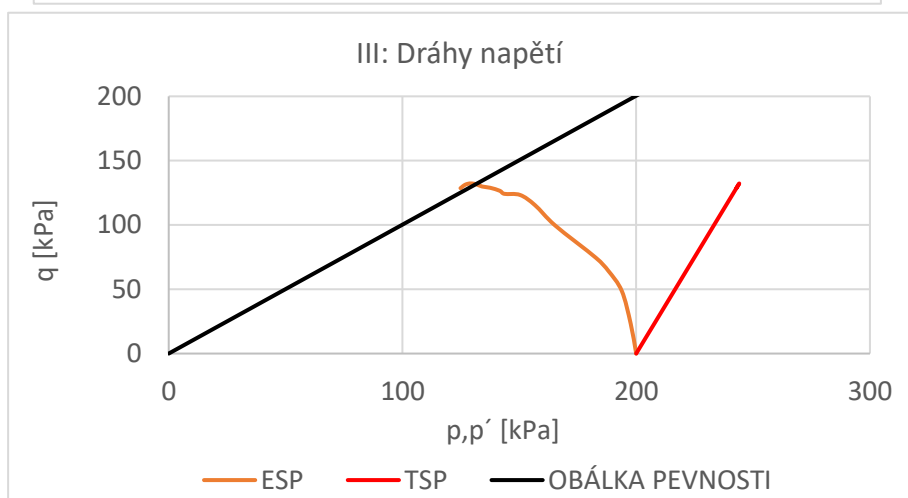
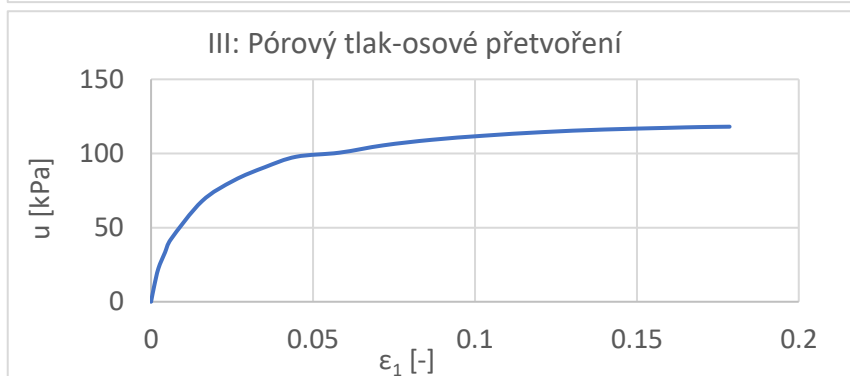
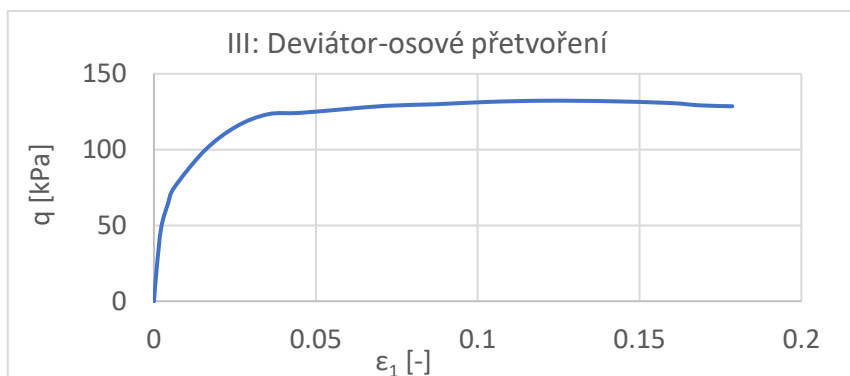
| ZKOUŠKA I | | | | | |
|-----------|--------|-------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| h [mm] | d [mm] | Sytící tlak [kPa] | Komorový tlak [kPa] | Rychlost zatěžování [mm/min] | φ_{cs}^* [°] |
| 76 | 38 | 400 | 700 | 0.005 | 24.2 |



| ZKOUŠKA II | | | | | |
|------------|--------|-------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| h [mm] | d [mm] | Sytící tlak [kPa] | Komorový tlak [kPa] | Rychlost zatěžování [mm/min] | φ_{cs}^* [°] |
| 76 | 38 | 400 | 700 | 0.003 | 24.4 |



| ZKOUŠKA III | | | | | |
|-------------|--------|-------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| h [mm] | d [mm] | Sytící tlak [kPa] | Komorový tlak [kPa] | Rychlost zatěžování [mm/min] | φ_{cs}^* [°] |
| 76 | 38 | 400 | 600 | 0.003 | 25.4 |



| ZKOUŠKA IV | | | | | |
|------------|--------|-------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| h [mm] | d [mm] | Sytící tlak [kPa] | Komorový tlak [kPa] | Rychlost zatěžování [mm/min] | φ_{cs}^* [°] |
| 77 | 38 | 400 | 550 | 0.003 | 24.6 |

